



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH MOBILNÍHO ROBOTU S UŽIVATELSKÝM
ROZHRANÍM VYUŽÍVAJÍCÍM ROZŠÍŘENOU REALITU**

DESIGN OF A MOBILE ROBOT WITH AN AUGMENTED REALITY USER INTERFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Adámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Bastl

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Roman Adámek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Michal Bastl**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh mobilního robotu s uživatelským rozhraním využívajícím rozšířenou realitu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem mobilního robotu na platformě vybraného jednodeskového počítače, jakým může být například Raspberry Pi. Úkolem studenta bude navrhnout vlastní unikátní řešení na míru. Práce se tedy bude skládat z návrhu mechanických i elektrických komponent robotu. Vzhledem k využití robotu k zábavním účelům je nedílnou součástí interakce s uživatelem. Součástí práce je vytvoření uživatelského rozhraní k ovládání robotu s prvky rozšířené reality.

Cíle diplomové práce:

- 1) Podle výchozích požadavků vypracujte různé koncepce řešení mobilního robotu s bezdrátovým přenosem obrazu pro účel interaktivního exponátu.
- 2) Vypracujte návrh vybraného řešení. Definujte potřebný hardware a software. Navrhněte mechanické komponenty a jejich uspořádání.
- 3) Vytvořte interaktivní uživatelské rozhraní pro dálkové ovládání robotu, do kterého zakomponujte prvky rozšířené reality.
- 4) Vyřešte potřebu dobíjení robotu během provozu. Robot by měl nízký stav baterie signalizovat.
- 5) Ověřte a zhodnoťte výsledky práce pomocí testů v podobě ukázkových miniher.

Seznam doporučené literatury:

CORKE, Peter I. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB. Berlin: Springer, 2011. Springer tracts in advanced robotics, v. 73. ISBN 9783642201448.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí čtyřkolového mobilního robotu určeného pro interaktivní exponát a výukové účely. Tento robot disponuje možností bezdrátového přenosu obrazu a manipulací s objekty.

Dále je v práci řešena realizace nabíjecí stanice robotu a uživatelské rozhraní sloužící k jeho ovládání, které obsahuje prvky rozšířené reality a minihry.

Summary

This thesis deals with the design and construction of a four-wheeled mobile robot designed for an interactive exhibit and educational purposes. This robot is capable of wireless image transmission and manipulation with objects.

In addition, this thesis deals with the construction of a charging station and user interface for controlling the robot which contains elements of augmented reality and minigames.

Klíčová slova

Mobilní robot, rozšířená realita, AR, nabíjecí stanice, uživatelské rozhraní, UI, grafické uživatelské rozhraní, GUI, HAT

Keywords

Mobile robot, augmented reality, AR, charging station, user interface, UI, graphical user interface, GUI, HAT

Bibliografická Citace

ADÁMEK, R. *Návrh mobilního robotu s uživatelským rozhraním využívajícím rozšířenou realitu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 64 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Bastl.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Návrh mobilního robotu s uživatelským rozhraním využívajícím rozšířenou realitu* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Bastla, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Roman Adámek

Brno

.

Děkuji svému vedoucímu Ing. Michalu Bastlovi, za svědomité vedení mé diplomové práce. Dále také Patriku Vávrovi za výbornou spolupráci a všem, kteří přispěli radami a připomínkami k jejímu dokončení.

Roman Adámek

Obsah

1	Úvod	9
2	Analýza problému	10
2.1	Rozdělení činností na projektu	10
3	Návrhy mobilního robotu	11
3.1	Výchozí požadavky	11
3.2	Podvozek	11
3.2.1	Kolové podvozky	11
3.2.2	Pásové podvozky	14
3.2.3	Kráčivé podvozky	14
3.2.4	Hybridní podvozky	15
3.3	Řídicí elektronika	15
3.3.1	Raspberry Pi	16
3.3.2	BeagleBone Blue	17
3.3.3	Jetson Nano	17
3.3.4	Porovnání	18
3.4	Bezdrátový přenos obrazu	20
3.4.1	Samostatný modul	20
3.4.2	Jednodeskový počítač	21
3.5	Návrhy	21
3.5.1	Varianta I	21
3.5.2	Varianta II	22
4	Mobilní robot	23
4.1	Popis vybraného řešení	23
4.2	Mechanická konstrukce	25
4.2.1	Nosná konstrukce	25
4.2.2	Manipulátor	25
4.2.3	Nabíjecí konektor	26
4.2.4	Kola	26
4.3	Pohon	27
4.4	Elektronika	30
4.4.1	Senzory	30
4.4.2	Podřazená řídicí jednotka	31
4.5	Baterie	34
4.5.1	Energetická bilance	34
4.5.2	Provedení	35
5	Nabíjecí stanice	37

5.1	Mechanická konstrukce	37
5.2	Elektronika	38
5.2.1	Proces nabíjení	39
6	Uživatelské rozhraní	42
6.1	Popis uživatelského rozhraní	42
6.1.1	Výstupy	42
6.1.2	Vstupy	43
6.2	Prvky rozšířené reality	44
6.3	Provedení grafického rozhraní	45
6.3.1	Vykreslování rozšířené reality	45
6.3.2	Interakce s prvky rozšířené reality	46
6.4	Herní prvky	50
7	Zhodnocení	53
7.1	Mobilní robot	53
7.2	Nabíjecí stanice	53
7.3	Uživatelské rozhraní	54
8	Závěr	55
	Literatura	56
	Seznam zkratk	59
	Seznam symbolů	60
	Seznam obrázků	61
	Seznam tabulek	63
	Přílohy	64

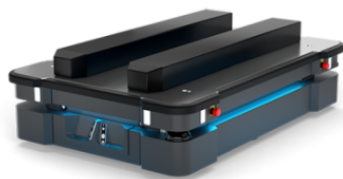
1 Úvod

Mobilní robotika je v současné době prudce se rozvíjející odvětví. Můžeme to pozorovat denně u osobních automobilů, které s každým novým modelem nebo SW aktualizací dostávají nové funkce, díky kterým postupně přebírají úlohu řidiče. Může se jednat o jednoduché funkce jako je adaptivní tempomat, asistent jízdních pruhů nebo pokročilejší funkce automatického parkování. Svatým grálem těchto snah je vytvoření plně autonomního vozidla.

Další oblastí, ve které se již delší dobu využívají mobilní roboti je průmysl, zvláště pak oblast přepravy a skladování. Dnešní průmyslový mobilní roboti jsou již schopni autonomního pohybu bez nutnosti úprav výrobních prostor, kdy v minulosti využívali k navigaci čáry na podlaze, indukční smyčky nebo magnety v podlaze, popřípadě majáky nebo referenční značky v prostoru. Příkladem moderního mobilního průmyslového robotu může být MiR500 od společnosti Mobile Industrial Robots zobrazený na obrázku 1.1a

Určitě nesmí být opomenuta ani kategorie mobilních robotů používaných k průzkumným a záchranným pracím. Tito roboti se používají v prostředích a podmínkách, které jsou lidem nebezpečné nebo nepřístupné. Příkladem může být robot PMORPH, zobrazený na obrázku 1.1b, který byl použit k průzkumu poškozeného reaktoru elektrárny Fukušima I v Japonsku. Tento robot sice nedisponuje možností autonomního pohybu, jelikož je řízen ručně přes kabel, o to složitější ale byl vývoj robotu, který musí odolat podmínkám poškozeného jaderného reaktoru.

Poslední zde zmíněnou kategorií je ta, do které spadá robot vytvořený v rámci této diplomové práce, a tou jsou mobilní roboti určené pro zábavu a vzdělání. S tím, jak roste propojení našeho života s elektronikou, výpočetní technikou a dalšími moderními technologiemi, roste i potřeba technického vzdělání v těchto oblastech. Ke zvýšení zájmu nové generace o tuto oblast by měly pomoci i tyto roboty. Jejich cílem je nadchnout děti pro techniku již v útlém věku a naučit je hravou formou principy algoritmického myšlení, definování problémů a jejich řešení. Konkrétních produktů je v této oblasti celá řada a liší se svou kvalitou, podporou výrobce a cílovou skupinou. Výborným příkladem v této kategorii může být stavebnice LEGO Mindstorms (obrázek 1.1c), která v sobě kombinuje hravost stavění robotů a jejich programování. Kdy programování samotné je přizpůsobeno pro všechny věkové kategorie od jednoduchého blokového programování až po složité programy psané například v MATLABu.



(a) MiR500 [1]



(b) PMORPH [2]



(c) TRACK3R [3]

Obrázek 1.1: Přehled mobilních robotů

2 Analýza problému

Cílem této práce je vytvoření mobilního robotu, který by měl sloužit jako základ plánovaného interaktivního exponátu pro výstavu o robotice. Tento exponát bude tvořen stylizovaným prostředím planety Mars, ve kterém bude moci návštěvník jezdit s dálkově ovládaným robotem a bude jej ovládat na základě obrazu přenášeného z kamery umístěné na robotu. Součástí prostředí budou také naučné a herní prvky, tyto prvky budou buď virtuální, vytvořené pomocí rozšířené reality nebo reálné.

Zároveň je zde i určitý potenciál využití robotu také k výukovým účelům, popřípadě jako edukativní hračku.

Společně s robotem bude vytvořena nabíjecí stanice, která bude sloužit k nabíjení baterie robotu. Tato stanice bude navržena tak, aby umožňovala nabíjení bez zásahu obsluhy exponátu.

2.1 Rozdělení činností na projektu

Činnosti na tomto projektu byly rozděleny do dvou diplomových prací, této a diplomové práce Patrika Vávry [4].

V této práci je popsán návrh konstrukce, elektroniky a řídicího programu běžícího na mikrokontroléru robotu. Dále popis konstrukce nabíjecí stanice s elektronikou a programem na mikrokontroléru stanice. V poslední části je popsáno uživatelské rozhraní spolu s ukázkovými minihrami.

V práci Patrika Vávry je popsána realizace autonomní navigace robotu v daném prostředí s využitím frameworku Robot Operating System (ROS), dojetí do nabíjecí stanice, minihry a propojení jednotlivých částí v rámci ROS.

3 Návrhy mobilního robotu

3.1 Výchozí požadavky

Z popisu uvedeného v předchozí kapitole, vyplývají na mobilní robot následující požadavky:

- Robustní konstrukce
- Bezúdržbový provoz
- Vysoká spolehlivost
- Příznivá cena
- Snadná opravitelnost
- Schopnost fyzicky interagovat s prostředím exponátu
- Schopnost autonomního pohybu
- Schopnost bezdrátového přenosu obrazu
- Schopnost komunikovat v rámci frameworku ROS

3.2 Podvozek

V současné době se můžeme setkat s mobilními roboty které jsou určeny pro provoz pod vodou, na hladině, na zemi, pod zemí i ve vzduchu. V rámci připravovaného exponátu se omezíme pouze na mobilní roboty pohybující se po zemi, ale i v této oblasti existuje široká škála různých způsobů pohybu a jejich modifikací.

V následující části budou popsány nejčastěji se vyskytující typy podvozků spolu s jejich výhodami a nevýhodami. Ucelený přehled můžeme nalézt například v publikacích [5] a [6].

Podvozky mobilních robotů můžeme členit do následujících kategorií:

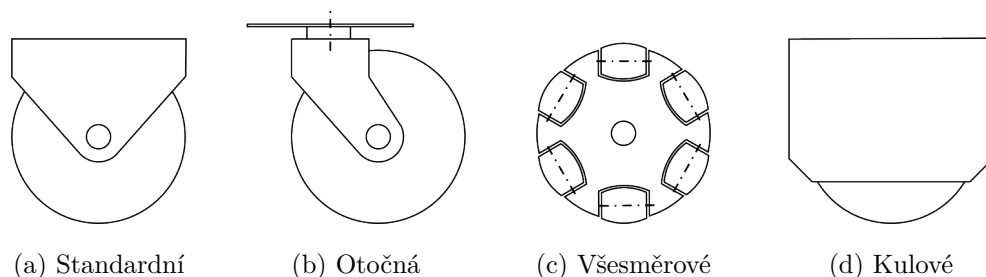
- Kolové
- Pásové
- Kráčivé
- Hybridní
- Skákavé
- Plazivé

3.2.1 Kolové podvozky

Mobilní roboty s kolovými podvozky patří mezi ty nejrozšířenější z důvodu vysoké efektivity pohybu, snadnosti jeho realizace a relativně dobré prostupnosti terénem.

U kolových robotů se můžeme setkat se čtyřmi základními typy kol. Jsou to standardní kola (obrázek 3.1a), otočná kola (obrázek 3.1b), všesměrová kola (obrázek 3.1c) a kulová kola (obrázek 3.1d).

Standardní kola, ať poháněná nebo ne, mají dva stupně volnosti (rotaci kolem své osy a kolem pólu pohybu). Otáčivé kolo má tři stupně volnosti (rotaci kolem své osy, kolem pólu



Obrázek 3.1: Základní typy kol

pohybu a natáčení celého kola). Všesměrová kola mají taktéž tři stupně volnosti. Dosahují toho pomocí válečků umístěných po obvodu kola. Tyto válečky svírají s osou kola nejčastěji 90° nebo 45° a umožňují pohyb kola v tomto směru s minimálním odporem. Posledním typem je kulové kolo, které se vyznačuje nekonečně mnoha osami rotace.

Tyto druhy kol mohou být použity samostatně nebo v kombinaci s jinými typy k vytvoření řady různých podvozků. Dále budou popsány pouze nejčastěji používané kolové podvozky.

Dvoukolové podvozky

Mezi dvoukolové podvozky patří podvozky typu jízdního kola a diferenciálně řízeného dvoukolového podvozku. Obecně platí, že dvoukolové podvozky jsou nestabilní. Nicméně, v případě diferenciálně řízeného dvoukolového podvozku existuje konfigurace, při které se stává stabilním. Je to v případě, kdy je těžiště robotu pod osou kol.

Z důvodu své přirozené nestability, jsou tyto podvozky používány převážně pro experimentální platformy, u kterých se kromě autonomního pohybu řeší i regulace nestabilního systému.

Trojkolové podvozky

Trojkolové podvozky patří v oblasti mobilní robotiky k těm nejrozšířenějším z řady důvodů. Jedním z nich je, že trojkolový podvozek má s třemi body kontaktu minimální počet kol nutných pro vytvoření stabilní platformy, za předpokladu, že se těžiště nachází v trojúhelníku jehož vrcholy tvoří body dotyku podvozku s povrchem. S tím souvisí i nízký počet dílů a nižší hmotnost v porovnání s jinými typy. Další výhodou je, že trojkolové podvozky se mohou vyskytovat v řadě konfigurací s různými typy kol. Obecnou nevýhodou trojkolových podvozků je, že se příliš nehodí do terénu z důvodu nižší stability a většího zatížení kol v porovnání například s čtyřkolovým podvozkem.

- Diferenciální trojkolový podvozek (obrázek 3.2a)

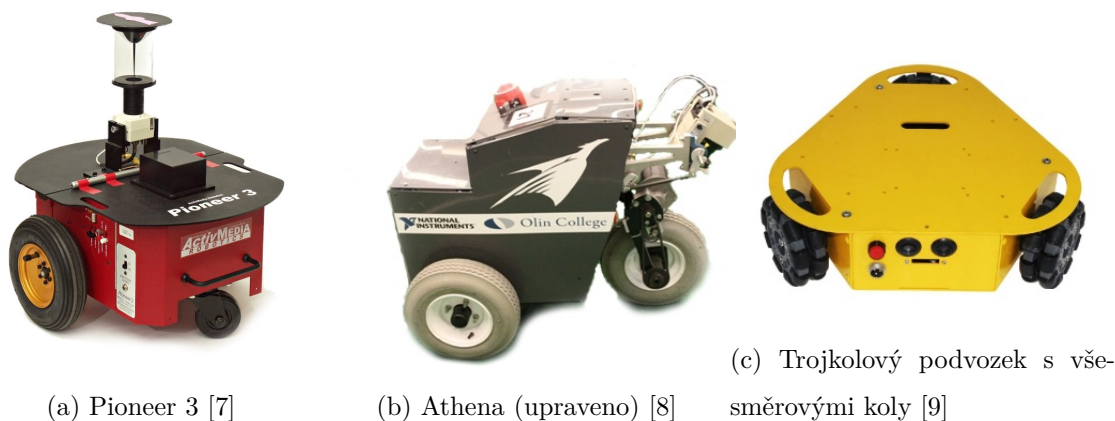
Jde pravděpodobně o nejrozšířenější formu trojkolového podvozku využívaného v mobilní robotice. Podvozek se skládá ze dvou nezávisle řízených kol a třetího nepoháněného kola, nejčastěji se jedná o otočné nebo kulové kolo. Díky diferenciálnímu řízení má podvozek dobré vlastnosti z hlediska manévrovatelnosti a odhadu polohy na základě odometrie. Pokud jsou navíc kola umístěna ve středu podvozku, může se robot otáčet na místě aniž by se měnila poloha jeho středu. Nevýhodou této konstrukce je, že pro přímou jízdu je nutné, aby se obě poháněná kola otáčela stejnou rychlostí.

- Trojkolový podvozek s jedním poháněným a natáčivým kolem (obrázek 3.2b)

Tato konstrukce je charakteristická tím, že má dvě volně otočná kola a jedno kolo, které je poháněné a zároveň se může natáčet kolem vertikální osy. Z důvodu větší mechanické složitosti je tato konstrukce méně častá, ale oproti diferenciálnímu podvozku má tu výhodu, že je zde oddělen pohon pro otáčení a přímou jízdu. Pro jízdu vpřed tedy stačí zamezit natáčení poháněného kola.

- Trojkolový podvozek s všesměrovými koly (obrázek 3.2c)

Jde o další typickou konstrukci trojkolového podvozku, který se vyznačuje tím, že se robot může pohybovat všemi směry, aniž by musel měnit své natočení kolem svislé osy, tato kategorie robotů se označuje také jako holonomní. Výhodou této konstrukce je vysoká manévrovatelnost. Nevýhodami jsou složité řízení, velmi nepřesný odhad polohy z odometrie, nižší účinnost pohonu z důvodu smýkání a nevhodnost pro pohyb v terénu.



Obrázek 3.2: Přehled trojkolových podvozků

Čtyřkolové podvozky

Tyto podvozky mají obecně oproti trojkolovým podvozkům lepší prostupnost terénem z důvodu rozložení hmotnosti na více kol, větší stability a možného pohonu všech kol. Stejně jako u trojkolových podvozků i zde existuje řada různých verzí.

- Ackermanův podvozek (obrázek 3.3a)
Ackermanův podvozek se využívá hlavně u mobilních robotů, kteří se pohybují vyššími rychlostmi a nejsou u nich kladeny velké požadavky na manévrovatelnost, jelikož se robot s tímto podvozkem nemůže otočit na místě. Mezi výhody tohoto podvozku patří dobrý odhad polohy na základě odometrie a oddělené pohony pro otáčení a přímou jízdu. Podvozek může existovat v konfiguraci s poháněnou přední, zadní nebo oběma nápravami. Pro zvýšení manévrovatelnosti, může mít podvozek obě nápravy řízené. Mezi nevýhody patří již zmíněná horší manévrovatelnost, větší složitost konstrukce a nutnost diferenciálu na poháněné nápravě k zamezení smýkání kol.
- Čtyřkolový podvozek s všesměrovými koly (obrázek 3.3b)
Stejně jako trojkolový podvozek se i čtyřkolový podvozek s všesměrovými koly vyznačuje vysokou manévrovatelností. Navíc má oproti trojkolovému vyšší stabilitu. Nicméně nevýhody jsou pro oba podvozky stejné.
- Čtyřkolový podvozek řízený smykem (obrázek 3.3c)
Tato konstrukce se vyznačuje tím, že kola na jednotlivých stranách podvozku se otáčejí stejnou rychlostí a k zatáčení dochází smykem, tedy změnou rychlosti otáčení kol na jednotlivých stranách. Tyto podvozky se vyznačují vysokou robustností a jednoduchostí mechanické konstrukce. Podvozek může mít jednotlivá kola poháněna vlastními motory nebo může být použit jeden motor pro pohon obou kol na jedné straně například pomocí řetězového nebo řemenového převodu. Nevýhody podvozku jsou horší určování polohy na základě odometrie z důvodu smýkání kol, z téhož důvodu plyne i horší účinnost pohonu. Další nevýhodou je, že otáčení a přímý pohyb nejsou nezávislé. Pro přímý pohyb je nutno udržovat rychlost kol na obou stranách stejnou.



Obrázek 3.3: Přehled čtyřkolových podvozků

3.2.2 Pásové podvozky

Pásové podvozky mají vysokou prostupnost terénem a z důvodu velké stykové plochy pásů se zemí jsou vhodné i pro pohyb po měkkých a sypkých površích. Dále se vyznačují svou vysokou manévrovatelností. K zatáčení využívají smyku což v kombinaci s velkou stykovou plochou pásů se zemí vede k velkým ztrátám třením. Mohou také existovat ve variantách, které využívají více samostatných částí opatřených pásy pro zvýšení prostupnosti, viz obrázek 3.4. Nevýhodou pásových podvozků je velmi špatný odhad polohy na základě odometrie z důvodu smýkání pásu, nízká energetická účinnost, nutnost údržby pásů (napínání, výměna) a závislost rotačního a translačního pohybu.



Obrázek 3.4: ENDEAVOR ROBOTICS KOBRA [13]

3.2.3 Kráčivé podvozky

Spolu s pokrokem v oblastech výpočetní techniky, senzoriky, pohonů a výkonové elektroniky dochází k rozvoji i kráčivých podvozků. Tyto podvozky se vyznačují vysokou mobilitou, schopností překonávat překážky, skákat, měnit svou výšku a další. Tyto výborné vlastnosti jsou ale vykoupeny velmi vysokou mechanickou složitostí a náročností řízení pohybu.

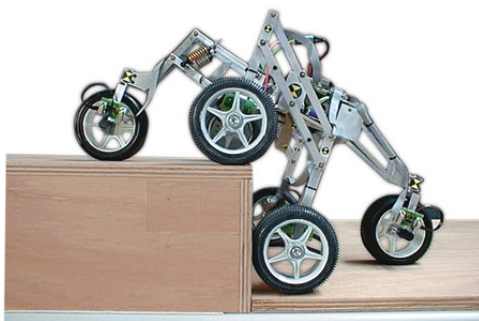
Konstrukce kráčivých robotů jsou nejčastěji inspirovány přírodou, a proto se můžeme setkat s dvounohými roboty připomínajícími člověka, čtyřnohými roboty inspirovanými savci (obrázek 3.5) nebo plazi a šestinohými roboty vycházejícími ze stavby těla hmyzu.



Obrázek 3.5: Boston Dynamics SpotMini [14]

3.2.4 Hybridní podvozky

Hybridní podvozky kombinují nejčastěji kolové a kráčivé podvozky, viz obrázek 3.6. Tímto spojením se získá podvozek, který kombinuje výhody kráčivého podvozku v náročném terénu a kolového podvozku na zpevněných úsecích. Tato konstrukce se v současné době nejvíce využívá u robotů určených pro vesmírný průzkum jako jsou Spirit, Opportunity a Curiosity, které využívají typ podvozku označovaný jako rocker-bogie.



Obrázek 3.6: Shrimp [15]

3.3 Řídicí elektronika

Úkolem řídicí elektroniky bude v rámci mobilního robotu řízení motorů, čtení výstupů z enkodérů a komunikace s dalšími senzory. Dále musí být elektronika schopna komunikovat s frameworkem ROS, který je využit pro lokalizaci a navigaci robotu.

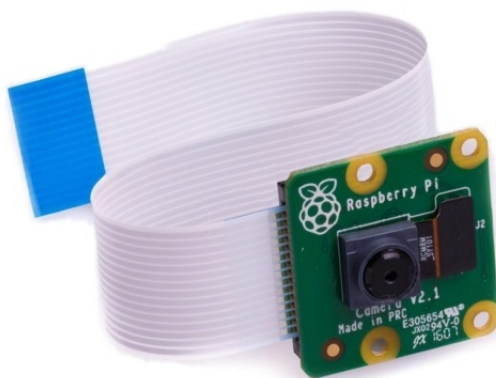
V současné době se při volbě řídicí elektroniky pro mobilní roboty využívají nejčastěji dvě řešení.

Prvním z nich je využití mikrokontroléru spolu s výkonovou elektronikou pro řízení motorů a modulu pro bezdrátovou komunikaci s počítačem, na kterém běží ROS. Tyto moduly mohou komunikovat například prostřednictvím Bluetooth, Wi-Fi nebo XBee. Toto řešení se vyznačuje svou jednoduchostí a nízkou cenou. Nevýhodou je, že s tímto řešením nelze použít pokročilých senzorů jako jsou například kamery a vyhodnocování jejich výstupů přímo v robotu. Proto se toto řešení využívá hlavně pro jednodušší aplikace, které nevyužívají zpracování obrazu nebo umělou inteligenci.

Další možností je využít některý z dnes velmi rozšířených jednodeskových počítačů, který



Obrázek 3.7: Raspberry Pi 3 Model B+ [16]



Obrázek 3.8: Camera module V2 [17]

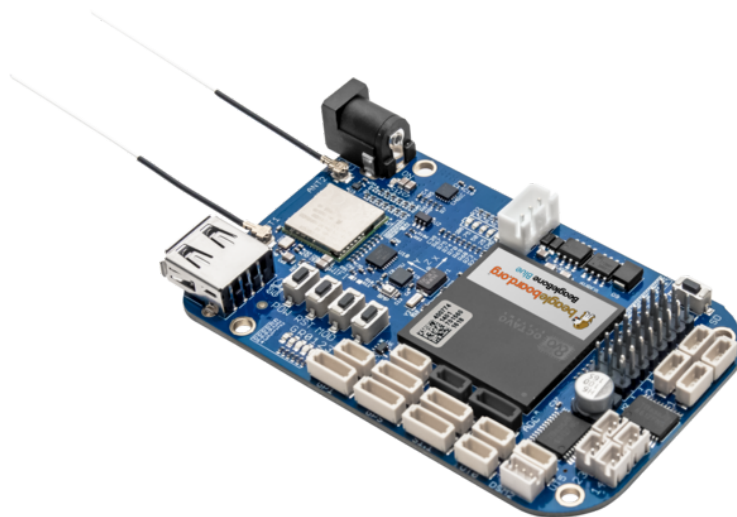
se například stará o zpracování dat z kamery, lidarů, komunikaci s ROS a podřazeným mikrokontrolérem, který má na starost řízení motorů, čtení dat z enkodéru a případně další činnosti.

Mezi nejrozšířenější jednodeskové počítače patří Raspberry Pi (RPi) a počítače využívající stejného formátu jako ASUS Tinker Board, Banana Pi nebo Orange Pi. Dále ve výčtu nesmí chybět počítač BeagleBone a v poslední době získávají na popularitě počítače z rodiny NVIDIA Jetson.

3.3.1 Raspberry Pi

RPi je v současné době bez pochyby nejrozšířenější jednodeskový počítač s rozsáhlou uživatelskou základnou. V nejnovější verzi se označuje Raspberry Pi 3 Model B+ [16] využívající procesor Broadcom BCM2837B0 označovaný jako System on Chip (SoC), viz obrázek 3.7. Parametry počítače jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Velkou výhodou RPi oproti ostatním počítačům je již zmíněná rozsáhlá komunita, díky které existuje velké množství návodů a rozšiřujících příslušenství označovaného jako Hardware Attached on Top (HAT), které umožňuje rozšířit funkce RPi pomocí AD a DA převodníků, relé, displejů, Power over Ethernet (PoE) a dalších. RPi umožňuje připojení kamery přes Universal Serial Bus (USB) nebo Camera Serial Interface (CSI) port, zároveň je kamera nabízena od výrobce jako standardní příslušenství a v nejnovější verzi disponuje senzorem Sony IMX219 s rozlišením 8 Mpx, viz obrázek 3.8. Výhodou této kamery jsou její malé rozměry a snadnost zabudování do konstrukce robotu.



Obrázek 3.9: BeagleBone Blue [18]

Nevýhodou RPi je, že není příliš vhodná pro řízení motorů, nemá periferie pro práci s analogovými signály a disponuje pouze dvěma PWM generátory, přičemž jeden je používán pro audio výstup. Nicméně všechny tyto periferie je možné realizovat pomocí HAT.

3.3.2 BeagleBone Blue

Dalším populárním jednodeskovým počítačem je BeagleBone, který existuje v několika variantách. Pro tuto aplikaci se nejvíce hodí BeagleBone Blue [18], viz obrázek 3.9.

Tento počítač využívá čip Octavo Systems OSD3358 označovaný jako System in Package (SiP), který v sobě integruje 32bitový jednojádrový procesor AM3358, paměť a měniče.

Rozdíl mezi SiP a SoC je ten, že SiP se skládá ze samostatných nezávislých zařízení, které jsou pouze umístěny v jednom pouzdru a vzájemně propojeny. SoC je tvořen jedním integrovaným obvodem, který v sobě obsahuje všechny části.

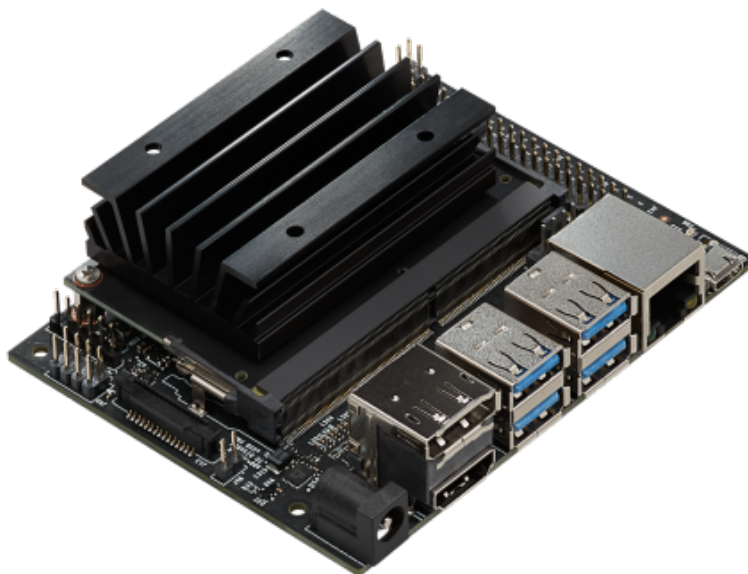
Procesor AM3358 v sobě integruje dva nezávislé 32bitové koprocesory a další prvky. Dále jsou na stejné desce osazeny H-můstky pro řízení čtyř motorů, vstupy pro enkodéry, ochranný a nabíjecí obvod pro dvoučládkovou Li-Ion baterii, výstupy pro 8 serv, Inertial Measurement Unit (IMU), barometr a další standardní periferie.

Deska je tedy velmi vhodná pro řízení mobilních robotů a podobných aplikací. Její nevýhodou je malá uživatelská podpora a mnohem horší dokumentace než u RPi. Další nevýhody oproti RPi jsou nižší výkon procesoru, méně RAM paměti, pouze jeden USB 2.0 konektor, který slouží k připojení periferií. Dále je nabíjecí proud baterie nastaven pevně na 1 A, což u baterií s velkou kapacitou, které by zajistili chod robotu po několik hodin znamená velmi dlouhé nabíjecí časy. A také je neregulované napětí baterie přímo vedeno přes H-můstky na motory.

3.3.3 Jetson Nano

V poslední době roste také popularita počítačů NVIDIA Jetson, které jsou určeny hlavně pro aplikace využívající umělou inteligenci a strojové vidění. Tyto počítače v sobě kombinují výkonné grafické procesory spolu s procesory architektury ARM.

Velmi zajímavým řešením je NVIDIA Jetson Nano [19], jedná se o System on Module (SoM) zařízení, které má tvar karty o velikost 70 x 45 mm. K této kartě nabízí výrobce vývojářský



Obrázek 3.10: NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [19]

kit, do kterého je možné ji osadit a která umožňuje přístup k jednotlivým perifériím, viz obrázek 3.10. Výhodné je, že se vstupně výstupní piny nachází ve 40pinové liště, která má stejné rozložení pinů jako RPi. Je tedy možné použít veškeré příslušenství pro RPi včetně kamery, která se připojuje do CSI portu.

Bohužel je počítač v době psaní této práce dostupný pouze pro vývojáře a prodej běžným zákazníkům je naplánován na přelom května a června roku 2019. Nicméně se do budoucna jedná o velmi zajímavou alternativu k současným jednodeskovým počítačům, zvláště v oblasti umělé inteligence, neuronových sítí a strojového vidění.

3.3.4 Porovnání

Kromě BeagleBone Blue nemají výše zmíněné počítače vhodné periferie pro řízení motorů nebo by jejich řízení bylo velmi problematické. Proto se nejčastěji volí řešení, kdy se využije podřazený mikrokontrolér, který komunikuje s počítačem prostřednictvím určité sběrnice.

Jelikož je využito frameworku ROS pro řízení robotu, je výhodné použít mikrokontrolér, pro který je již zajištěna podpora a vytvořeny knihovny pro komunikaci. Mezi tyto mikrokontroléry patří ty, které jsou podporovány platformou Arduino, mikrokontroléry od Texas Instruments využívané na vývojových platformách Launchpad, mikrokontroléry z řady ESP a vybrané mikrokontrolery od STMicroelectronics.

Parametr	RPi 3B+	BeagleBone Blue	Jetson Nano Developer Kit
Procesor	Broadcom BCM2837B0	AM3358	MPCore
Architektura	Cortex-A53 64-bit SoC	Cortex-A8 32-bit SiP	Cortex-A57 64-bit SoM
Počet jader	4	1	4
Frekvence	1,4 GHz	1 GHz	1,43 GHz
GPU	VideoCore 4	SGX PowerVR530	Maxwell 128 jader
RAM	1 GB	512 MB	4 GB
Úložiště	microSD	4 GB	microSD
Digitální I/O	28	8	28
Analogový vstup	0	4	0
Kamera	CSI-2	USB	CSI-2
Video výstup	HDMI 1.3, kompozitní video, DSI	—	HDMI 2.0, eDP 1.4
Audio výstup	3,5mm jack, I ² S, HDMI	—	I ² S
USB	4 x USB 2.0	1 x USB 2.0 klient 1 x USB 2.0 host	4 x USB 3.0
WiFi	2,4 a 5 GHz 802.11 b/g/n/ac	2,4 GHz 802.11 b/g/n	—
Bluetooth	Bluetooth 4.2, LE	Bluetooth 4.1, LE	—
Ethernet	1 x 300 Mb/s (přes USB 2.0)	—	1 x 11 Gb/s
UART	2	4	1
SPI	1	2	2
I ² C	2	1	3
PWM	2	8	0
CAN	0	1	0
Rozměr [mm]	85,6 x 56,5 x 17	86,4 x 54,6 x 17	100 x 80 x 29
Cena	1 000 Kč	2 100 Kč	2 300 Kč

Tabulka 3.1: Porovnání jednodeskových počítačů

3.4 Bezdrátový přenos obrazu

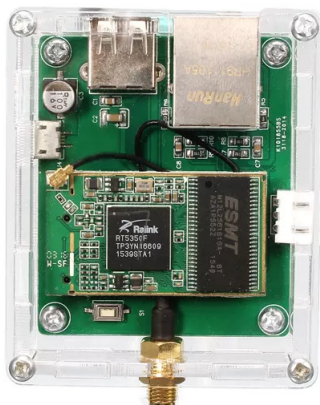
V současné době existuje řada různých způsobů bezdrátového přenosu obrazu. Jednotlivé způsoby mají svá specifika a svou cílovou skupinu. V našem případě je cílem přenášet obraz z kamery na robota do počítače, na kterém v rámci exponátu poběží uživatelské rozhraní umožňující interakci s robotem. Dalším cílem je realizovat přenos obrazu tak, aby nebylo vyžadováno přídavného Hardware (HW) ze strany uživatele v případě, že se bude robot nabízet jako edukativní hračka. V tomto případě se předpokládá, že robot bude ovládán z mobilního telefonu, tabletu nebo počítače.

Z výše zmíněných požadavků vyplývá, že není možné použít metody přenosu obrazu, které se používají například u dnes populárních dronů nebo televizních přenosů, kdy se využívá speciálních vysílačů a přijímačů. Nejschůdnější metodou je realizovat přenos obrazu prostřednictvím Wi-Fi.

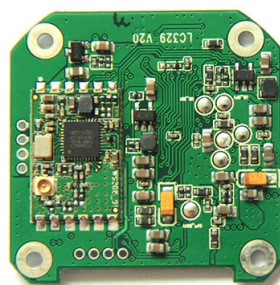
V závislosti na řídicí jednotce zvolené v předchozí podkapitole 3.3, lze využít jedno z následujících řešení.

3.4.1 Samostatný modul

V případě, že se jako řídicí jednotka použije pouze mikrokontrolér, musí být bezdrátový přenos obrazu řešen prostřednictvím externího modulu. Tyto moduly umožňují připojení kamery s výstupem přes USB port (obrázek 3.11a) nebo kompozitní videosignál (obrázek 3.11b). Vytváří vlastní Wi-Fi síť a chovají se jako server pro stream videa. Přistupovat je k nim možno z webového rozhraní nebo mobilních aplikací. Zároveň bývají zpravidla vybaveny portem pro sériovou komunikaci, který lze využít pro komunikaci s mikrokontrolérem.



(a) OpenWRT modul [21]



(b) LC329 (upraveno) [20]

Obrázek 3.11: Moduly pro bezdrátový přenos obrazu přes Wi-Fi

Velkou nevýhodou těchto modulů je ve většině případů špatná nebo chybějící dokumentace a podpora ze strany výrobce. Další nevýhodou je, že některé moduly vytváří vlastní webové rozhraní a nelze je proto jednoduše využít pro vlastní aplikaci.

3.4.2 Jednodeskový počítač

Pokud se využije řídicí jednotka v podobě jednodeskového počítače v kombinaci s mikrokontrolérem, je nejjednodušším řešením využít tento počítač pro připojení kamery, ať už přes USB port nebo CSI konektor. Následně je možné naprogramovat počítač dle vlastních požadavků. Většina jednodeskových počítačů disponuje již v základu Wi-Fi modulem, pokud ne, je zpravidla možné využít Wi-Fi modul připojitelný do USB.

Počítač může vytvářet vlastní Wi-Fi síť nebo se připojovat do stávající sítě. Může se chovat jako webový server pro přístup k obrazu z kamery nebo posílat obraz klientovi prostřednictvím určitého transportního protokolu.

3.5 Návrhy

Na základě předchozího rozboru jednotlivých klíčových komponent mobilního robotu, můžeme vytvořit následující dvě varianty, z kterých bude vybráno finální řešení. Platí, že prvky jednotlivých variant jsou vzájemně záměnné a lze vytvořit i další varianty jako výsledek kombinace dvou výchozích.

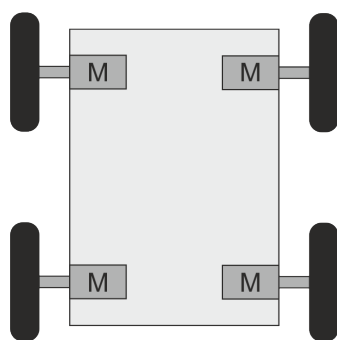
3.5.1 Varianta I

Podvozek

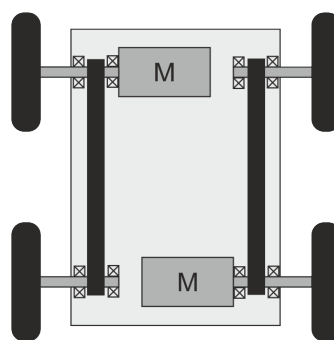
Typ podvozku je nejdůležitějším faktorem určujícím charakter mobilního robotu. Pro variantu I byl zvolen čtyřkolový podvozek řízený smykem, hlavně z důvodů robustnosti, jednoduchosti, stability a vhodnosti do terénu. Slabinou tohoto řešení, jak již bylo zmíněno v podkapitole 3.2.1, je horší odhad polohy z odometrie právě z důvodu smyku.

Provedení tohoto podvozku může být dvěma způsoby. Prvním z nich je využití samostatného motoru pro každé kolo (obrázek 3.12a), druhým je využít jeden motor pro každou stranu robotu a kola na stranách propojit řemenem nebo řetězem (obrázek 3.12b). Druhé řešení má oproti prvnímu tu výhodu, že je potřeba řídit pouze dva motory. Nevýhodou je větší mechanická složitost, kdy již nelze motory pevně uchytit na rám, ale je nutné zajistit upevnění motorů a zbývajících součástí jiným způsobem.

V obou případech se nepředpokládá s odpruženým uložením kol.



(a) Nezávisle poháněná kola



(b) Nezávisle poháněná dvojice kol

Obrázek 3.12: Varianty čtyřkolového smykem řízeného podvozku

Řídicí jednotka

Pro tuto variantu byla navržena řídicí jednotka sestávající z počítače RPi a podřazeného mikrokontroléru, u kterého bude zajištěna podpora v rámci platformy Arduino. Mikrokontrolér bude umístěn na rozšiřující desce umístěné na RPi a jeho úkolem bude řízení motorů a zpracování dat ze senzorů. Předpokládá se využití enkodérů pro motory a IMU.

Bezdrátový přenos obrazu

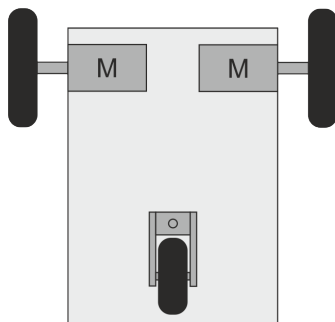
K bezdrátovému přenosu obrazu bude sloužit samotné RPi, které bude přes Wi-Fi přenášet obraz z kamery Raspberry Pi Camera Module V2 připojené do CSI portu.

3.5.2 Varianta II

Podvozek

Pro variantu II byl zvolen trojkolový diferenciální podvozek pro svou robustnost, jednoduchost a vyšší přesnost určování polohy na základě odometrie.

Schéma podvozku je zobrazeno na obrázku 3.13. V přední části se nachází dvě samostatně poháněná kola a v zadní části je umístěno otočné kolo. Stejně jako u varianty I, se ani tady nepočítá s odpružením kol.



Obrázek 3.13: Trojkolový diferenciálně řízený podvozek

Řídicí jednotka

Varianta II by měla být vybavena počítačem BeagleBone Blue. U kterého se využije toho, že jsou všechny periferie pro řízení motorů a senzory umístěné na jedné desce a které mohou být obsluhovány dvěma nezávislými koprocesory.

Bezdrátový přenos obrazu

Stejně jako u varianty I, i tady se využije samotný počítač k přenosu obrazu z kamery pomocí Wi-Fi. V tomto případě je ale nutné využít kameru, která má rozhraní USB.

4 Mobilní robot

4.1 Popis vybraného řešení

Z návrhů představených v předešlé kapitole byla zvolena varianta I.

Čtyřkolový podvozek byl zvolen z důvodu větší stability robotu a větší vhodnosti pro pohyb v terénu. Vliv na volbu měla i preference z hlediska designu. Dále byla vybrána možnost, kdy má každé kolo svůj motor, z hlediska jednodušší mechanické konstrukce s méně díly.

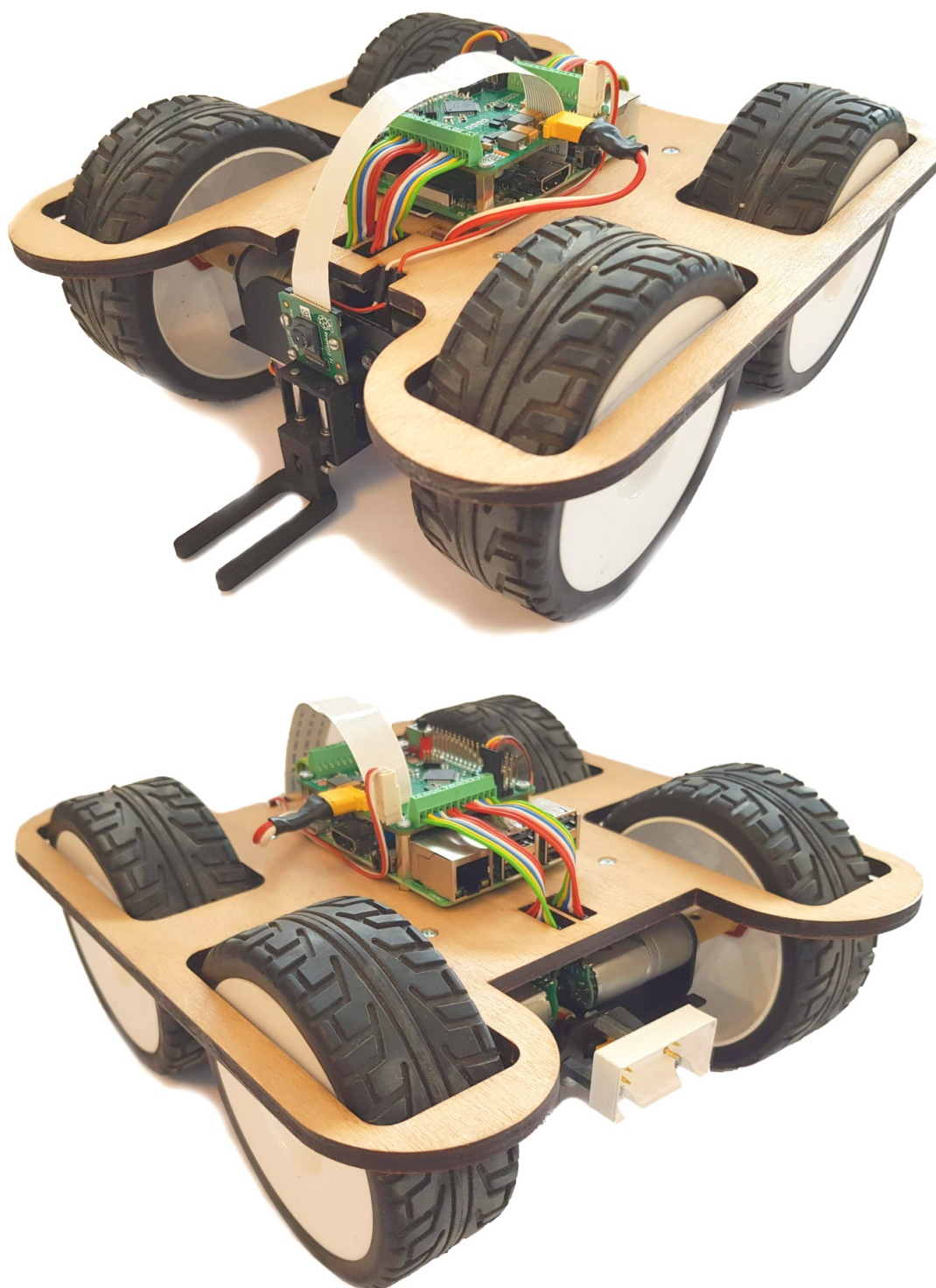
Počítač RPi byl zvolen z důvodu lepší dokumentace, podpory ze strany výrobce a komunity, větších zkušeností s jeho používáním a možnosti připojit Camera Module V2.

Mobilní robot bude mít následující specifikaci:

- Podvozek
 - Čtyřkolový smykem řízený podvozek s nezávisle poháněnými koly
- Pohon
 - Čtyři stejnosměrné motory s permanentními magnety a čelní převodovkou
- Manipulátor
 - Manipulátor s jedním stupněm volnosti
- Řídicí elektronika
 - Nadřazená řídicí jednotka — Raspberry Pi 3 Model B+
 - Podřazená řídicí jednotka — Řídicí jednotka vlastní konstrukce
- Kamera
 - Raspberry Pi Camera Module V2
- Zdroj energie
 - Pět Li-Ion akumulátorů typu 18650 s kapacitou článku 3 350 mAh doplněných ochranným a nabíjecím obvodem
- Nabíjení
 - Prostřednictvím konektoru v zadní části robotu

Výše zmíněné body budou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách.

Výsledný mobilní robot je zobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Výsledný mobilní robot

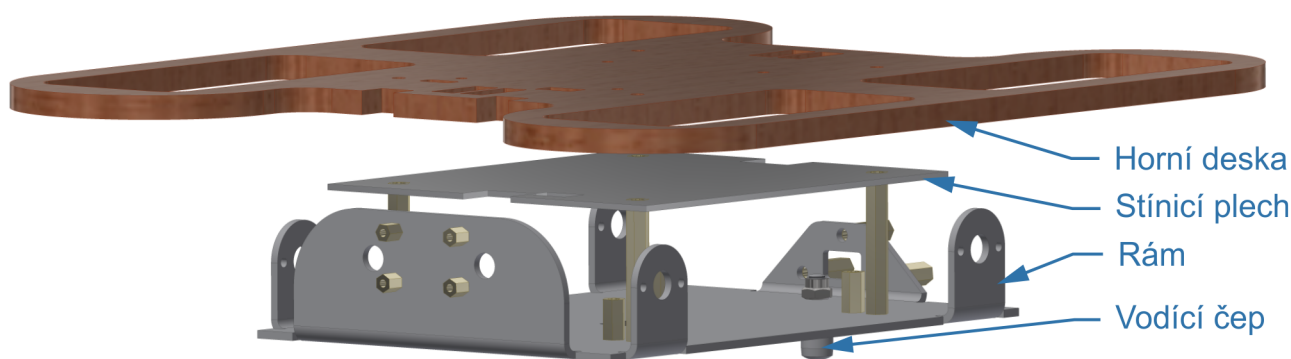
4.2 Mechanická konstrukce

4.2.1 Nosná konstrukce

Základem mechanické konstrukce robotu je ohýbaný rám, vyrobený z ocelového plechu tloušťky 2 mm. Tento rám obsahuje montážní díry pro upevnění dalších součástí. Po bocích se nachází čtveřice prvků pro upevnění motorů. K zadní straně se připevňuje nabíjecí konektor a k přední straně kamera a Light Emitting Diode (LED) světla. Kamera je ke snížení vibrací umístěna na pružných distančních sloupcích. Ve spodní části rámu je umístěn otvor pro hlavní vypínač a LED signalizující nabíjení baterií. Dále také otvory pro upevnění manipulátoru, distančních sloupků a naváděcího čepu, který slouží k navádění při zajištění do nabíjecí stanice.

Přes distanční sloupky je k rámu upevněna baterie, stínící plech sloužící k omezení elektromagnetického rušení a horní deska vyrobená z 6mm překližky řezané na laserové rezačce. V horní desce se nachází výřezy pro vedení kabelů od motorů, baterie, světel a modelářského serva. Dále díry pro upevnění horní desky k spodnímu rámu přes distanční sloupky a upevnění RPi. Horní deska má zaoblené vnější rohy z důvodu usnadnění najíždění do dokovací stanice, viz kapitola 5.

Výše popsaná nosná konstrukce je pro názornost zobrazena v rozpadu na obrázku 4.2.

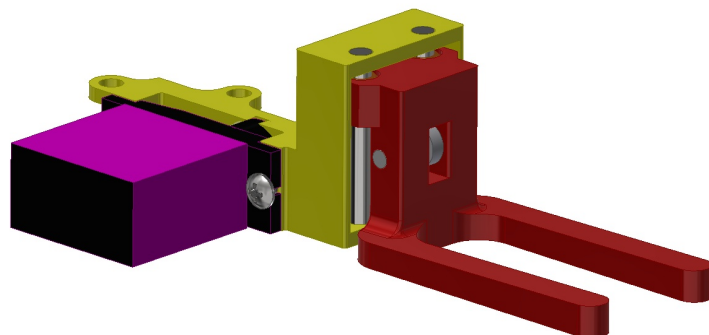


Obrázek 4.2: Nosná konstrukce

4.2.2 Manipulátor

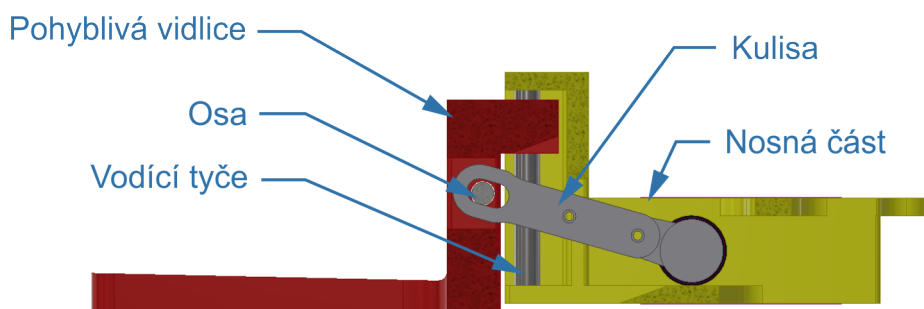
Manipulátor vyrobený pomocí 3D tisku je upevněn ve předu ze spodní strany rámu a má sloužit k interakci s reálnými objekty nacházejícími se v prostředí exponátu. I zde, stejně jako v celé konstrukci robotu, je kladen důraz na jednoduchost řešení. Proto byl zvolen manipulátor s jedním stupněm volnosti umožňující zdvižení objektu pomocí pohyblivé vidlice, viz obrázek 4.3. Horní plocha vidlice není vodorovná, ale svažuje se směrem k robotu. Je to z toho důvodu snížení rizika spadnutí převáženého objektu.

V pohyblivé vidlici manipulátoru jsou umístěna dvě samomazná kompozitní kluzná pouzdra, která se pohybují po vodících tyčích o průměru 3 mm.



Obrázek 4.3: Manipulátor

Pohon manipulátoru je realizován prostřednictvím modelářského serva. Přenos otáčivého pohybu výstupní hřídele serva na přímočarý pohyb vidlice je realizován pomocí kulisy, která je připojena k servu a pohybuje osou umístěnou na vidlici. Řez mechanismem manipulátoru je na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Řez manipulátorem

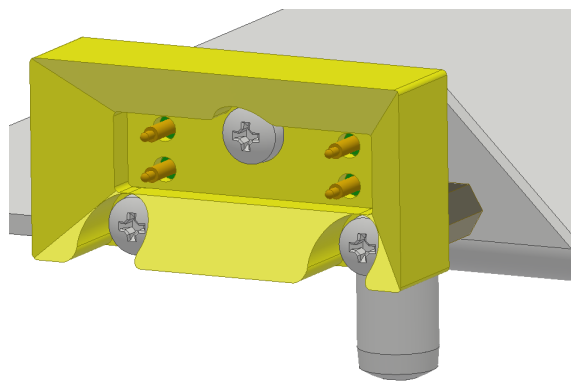
4.2.3 Nabíjecí konektor

Jelikož je v přední části robotu již umístěna kamera a manipulátor, musí být nabíjecí konektor umístěn na zadní straně. Nabíjení probíhá kontaktním způsobem, proto byly použity odpružené kontakty P70-2300045R od HARWINu, které zajistí správné spojení s nabíjecí stanicí i při mírném vychýlení robotu. Celkem jsou použity čtyři kontakty, dva pro kladný pól a dva pro záporný. Standardní nabíjecí proud je 1,75 A a jeden kontakt je dimenzován na 2 A, ke snížení proudu protékajícího kontaktem byly použity právě dva kontakty pro jeden pól.

Pro eliminaci vychýlení konektoru, při zájždění do nabíjecí stanice, je nad deskou plošných spojů s kontakty umístěn vytištěný plastový naváděcí prvek. Tento prvek má vnitřní stěny tvořené povrchem jehlanu, které zajišťují přesné spojení s protikusem na nabíjecí stanici a zároveň chrání odpružené kontakty před poškozením. Více informací o nabíjecí stanici je v kapitole 5. Pohled na nabíjecí konektor je na obrázku 4.5.

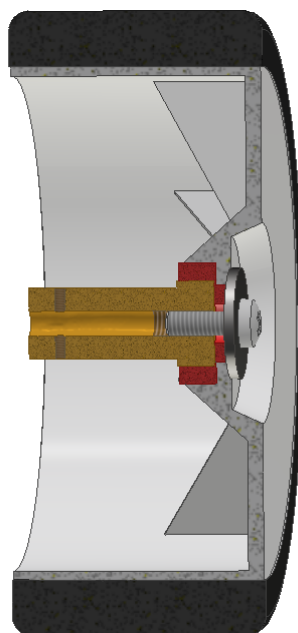
4.2.4 Kola

Pro přenos krouticího momentu z motorů na povrch, byla použita plastová kola s gumovým pláštěm o průměru 100 mm, používaná u modelů na dálkové ovládání. Kola mají 17mm šestiú-



Obrázek 4.5: Nabíjecí konektor

helníkový unašeč a jsou přes redukci na 12mm unašeč (zobrazena červeně) a mosaznou spojku (zobrazena oranžově) spojena s výstupní hřídelí motoru, viz obrázek 4.6.



Obrázek 4.6: Sestava kola

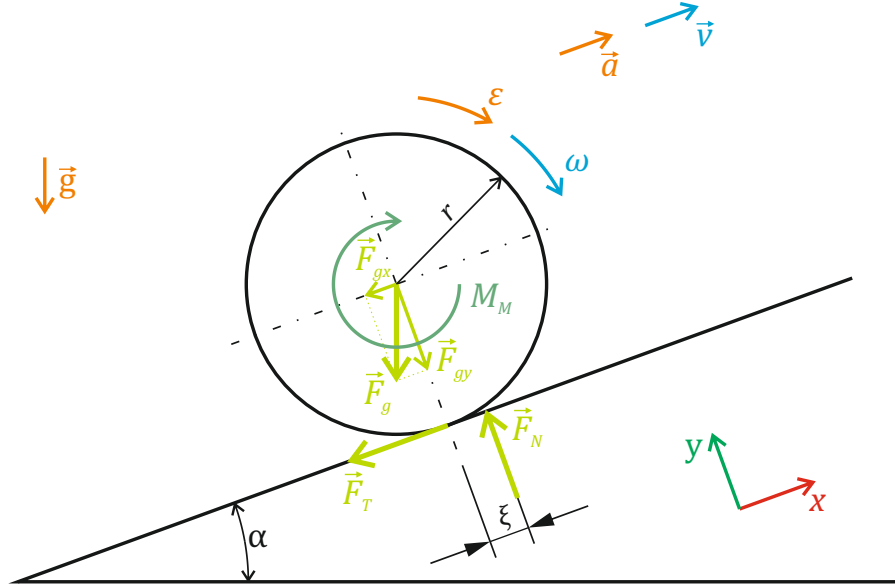
4.3 Pohon

Pro zvolení správného motoru bylo nejdříve nutné si nadefinovat základní výchozí parametry robotu:

- Celková hmotnost $m = 2 \text{ kg}$
- Počet hnáných kol $w = 4$
- Průměr kola $d = 0,1 \text{ m}$
- Maximální rychlost $v = 0,2 \text{ m s}^{-1}$
- Maximální zrychlení $a = 0,5 \text{ m s}^{-2}$
- Stoupavost $\alpha = 15^\circ$

- Rameno valivého odporu $\xi = 0,025 \text{ m}$ [22]

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení hmotnosti na všechna kola, můžeme při výpočtu potřebného točivého momentu motoru vycházet z následujícího obrázku 4.7, na kterém je zobrazeno úplně jednoho kola robotu.



Obrázek 4.7: Uvolnění kola robotu

Na základě úplného uvolnění mohou být sepsány silové a momentové rovnice v jednotlivých osách a vazbová rovnice.

$$F_x : \frac{m}{4}a = -F_{gx} - F_T \quad (4.1)$$

$$F_y : 0 = -F_{gy} + F_N \quad (4.2)$$

$$M_z : -J\varepsilon = F_N\xi - M_M - F_T r \quad (4.3)$$

$$a = \varepsilon r \quad (4.4)$$

Kde:

- F_{gx} Průmět tíhové síly do osy x
- F_T Tečná síla
- F_{gy} Průmět tíhové síly do osy y
- F_N Normálová síla
- J Moment setrvačnosti
- ε Úhlové zrychlení
- M_M Točivý moment motoru
- r Poloměr kol

Po úpravách výše uvedených rovnic získáme vztah pro výpočet potřebného točivého momentu jednoho motoru.

$$M_M = \frac{m}{4}g \cos \alpha \xi + \frac{m}{4}a r + \frac{m}{4}g \sin \alpha r + J \frac{a}{r} \quad (4.5)$$

Poslední člen v rovnici 4.5 obsahuje moment setrvačnosti, který se skládá z momentu setrvačnosti kola, redukce, spojky, převodovky a rotoru motoru. Při prvotním výpočtu, moment setrvačnosti motoru a převodovky není ještě znám. Proto se může ve výpočtu použít pouze moment setrvačnosti kola nebo se celý tento člen může zanedbat, jelikož je jeho vliv na celkový moment malý.

Po dosazení do rovnice 4.5 a zanedbání posledního členu, vyjde požadovaný moment jednoho motoru 0,2 Nm.

Dále využijeme vztah 4.7 pro získání požadovaných otáček motoru.

$$v = \omega r = 2\pi n r \quad (4.6)$$

$$n = \frac{v}{2\pi r} \quad (4.7)$$

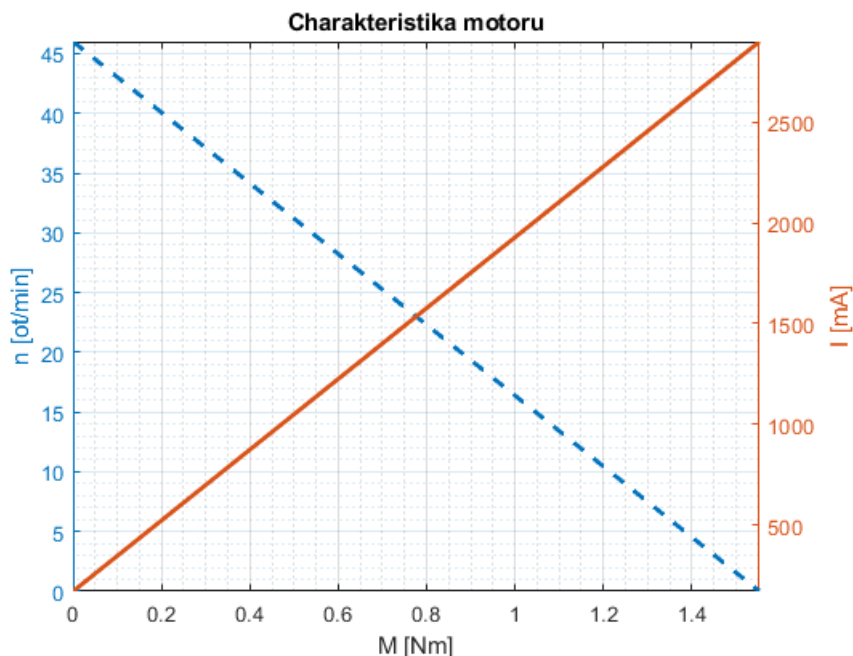
Kde:

ω Úhlová rychlost

n Otáčky za minutu

Po dosazení vychází požadovaná rychlost otáčení motoru 38 ot/min.

Na základě výše uvedených parametrů byl vybrán stejnosměrný motor s permanentními magnety Pololu 20D s převodovkou 312,5:1 a jmenovitým napětím 6 V [23]. Motor od Pololu byl zvolen z důvodu jejich široké nabídky motorů různých velikostí a parametrů spolu s příslušenstvím za nízkou cenu. Charakteristiky vybraného motoru jsou znázorněny v grafu 4.8. Můžeme vidět, že při požadovaném maximálním momentu motor dosahuje požadovaných otáček a je tedy vyhovující. Motor má také oboustrannou hřídel a je na něj možné umístit enkodér pro snímání natočení rotoru, viz obrázek 4.9.



Obrázek 4.8: Charakteristika motoru

4.4 Elektronika

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, elektronika starající se o řízení robotu, čtení dat ze senzorů a ovládání výstupů se skládá z počítače Raspberry Pi 3 Model B+ a podřazeného mikrokontroléru.

4.4.1 Senzory

Na mobilním robotu jsou osazeny standardní senzory používané v mobilní robotice jako jsou enkodéry, IMU a kamera.

Enkodéry

Enkodéry jsou u této konstrukce robotu nezbytné, neboť jak bylo zmíněno v rešeršní části, rotační a translační pohyb jsou vzájemně závislé. Proto je při požadavku čistě translačního pohybu nutné udržovat úhlovou rychlost všech kol stejnou. K tomu poslouží regulátory rychlosti, které budou rychlost kol regulovat na základě informací získaných z enkodérů.

Motory jsou vybaveny magnetickými enkodéry Pololu 3499 [24], které disponují 5 impulsy na otáčku magnetu umístěného na prodloužené hřídeli rotoru, viz obrázek 4.9. Při detekci náběžné a sestupné hrany na obou kanálech a při uvážení převodového poměru motoru 312,5:1 je výsledné rozlišení 6250 pulsů na jednu otáčku výstupní hřídele motoru.



Obrázek 4.9: Motor s enkodérem [24]

IMU

Byla použita IMU s devíti stupni volnosti LSM9DS1TR od STMicroelectronics [25]. Jednotka v sobě kombinuje tříosý akcelerometr, gyroskop a magnetometr.

Kamera

Kamera na robotu slouží k detekci referenčních značek používaných k lokalizaci robotu a zobrazování rozšířené reality. Zároveň je obraz z kamery zobrazován v rámci uživatelského rozhraní.

Zvolena byla Raspberry Pi Camera Module V2 [17], která je standardním příslušenstvím RPi a je připojena do CSI portu.

Kromě výše zmíněných senzorů se dá k robotu připojit i lidar. Ten se připojuje k RPi a kon-

krétní typ Hokuyo URG-04LX-UG01 byl použit pro Simultaneous localization and mapping (SLAM) v [4].

V případě potřeby je elektronika nachystaná na připojení libovolného analogového nebo digitálního senzoru či senzoru komunikujícího přes sběrnici USB, Serial Peripheral Interface (SPI) nebo Inter-Integrated Circuit (I²C). Sensory je dle potřeby možno připojit jak k podřazené řídicí jednotce, tak i k RPi (vyjma senzorů s analogovým výstupem).

4.4.2 Podřazená řídicí jednotka

Jelikož počítač RPi nedisponuje potřebnými periferiemi jako jsou PWM, časovače nebo analogové vstupy. Bylo rozhodnuto vytvořit pro něj rozšiřující elektroniku, která by se připojovala přes 40pinový konektor a měla by potřebné periferie. Tyto rozšiřující desky pro RPi se označují jako HAT.

Dalším cílem u této řídicí jednotky bylo to, aby byla využitelná i v jiných projektech, dala se používat nezávisle na RPi a byla jednoduše programovatelná v případě, že by byla využitelná jako edukativní hračka. Proto bylo zvoleno využití mikrokontroléru podporovaného v rámci platformy Arduino.

Byl zvolen 32bitový mikrokontrolér ATSAM21J18A od Atmelu [26]. Tento typ mikrokontroléru je vícepinová verze ATSAM21G18A, který se používá v rámci vývojových desek Arduino Zero, Arduino M0, Arduino MKR1000 a dalších. To, že byla použita odlišná verze mikrokontroléru, než se používá na výše zmíněných deskách, znamenalo upravení souborů *variants*, ve kterých se definují funkce a pojmenování jednotlivých fyzických pinů mikrokontroléru, na které se odkazuje při programování. Další úpravou, která se provedla, bylo zvýšení frekvence Pulse Width Modulation (PWM), která se využívá k řízení H-můstků, z výchozích 732 Hz na 10 kHz. Z důvodu snížení rozkmitu proudu, a tedy i momentu motoru.

Každá vývojová deska v rámci platformy Arduino má svá specifika, využívá jiný mikrokontrolér, má jiné zapojení atd. Z důvodu zachování kompatibility uživatelských zdrojových kódů má každá deska své *variants* soubory a knihovny pro práci s periferiemi. Aby bylo možné nově vytvořenou řídicí jednotku jednoduše používat bez nutnosti zásahů do souborů *variants* a knihoven ze strany uživatele, byla vytvořena nová specifikace pro tuto jednotku, kterou je možno si nainstalovat do prostředí Arduino IDE a používat ji jako jakoukoli jinou vývojovou desku v rámci platformy Arduino. Tato specifikace je k dispozici v elektronických přílohách, spolu s návodem na její instalaci.

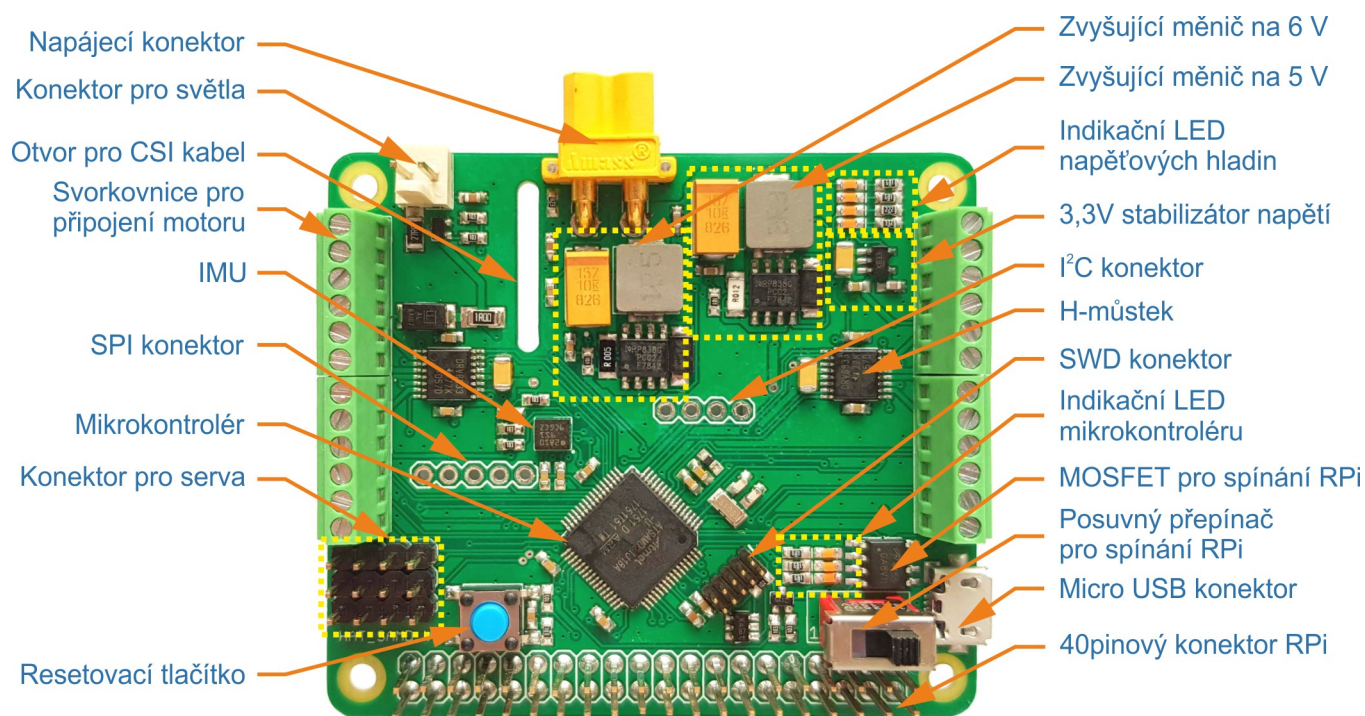
Řídicí jednotka využívá bootloader shodný s tím, který se používá na vývojové desce Arduino Zero. A je ji tedy možno programovat přes USB bez nutnosti používat programátor. Ten je nutný pouze při prvotním nahrání bootloaderu.

Tím, že řídicí jednotka vychází ze standardní vývojové Arduino desky, je možné ji programovat bez úprav z Matlabu, Simulinku, Labview a dalších programovacích prostředích. Pouze bude její využití omezeno na piny dostupné na výchozí verzi mikrokontroléru ATSAM21G18A. Nicméně úpravy, které by bylo nutno provést pro plnou podporu nejsou nikterak rozsáhlé, protože jde o stejnou rodinu mikrokontrolérů.

Popis HW

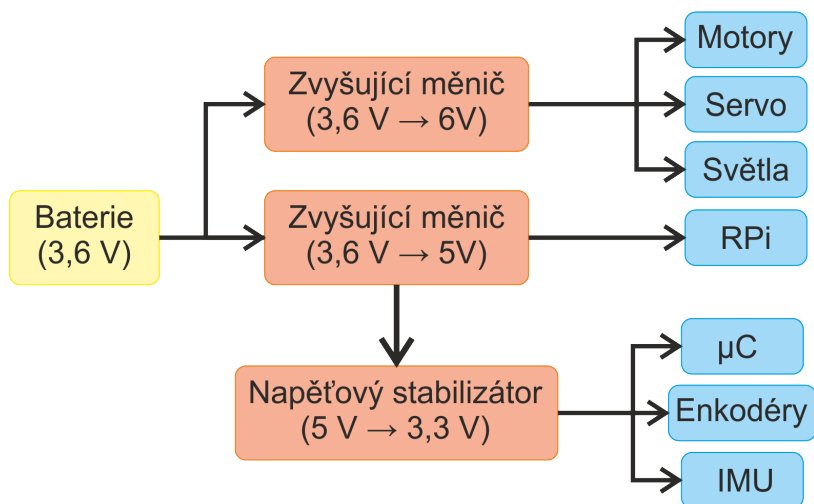
Samotná řídicí jednotka je zobrazena na obrázku 4.10. Její rozměr byl zvolen tak, aby odpovídal standardu rozšiřujících desek pro RPi.

V horní části se nachází vstupní napájecí konektor a měniče na jednotlivé napěťové úrovně. Jsou využity dva zvyšující měniče na 6 a 5 V s řídicím čipem LM3478 od Texas Instruments a 3,3V stabilizátor napětí MIC5205 od Microchip Technology. Schéma zapojení prvků na jednot-



Obrázek 4.10: Podřazená řídicí jednotka

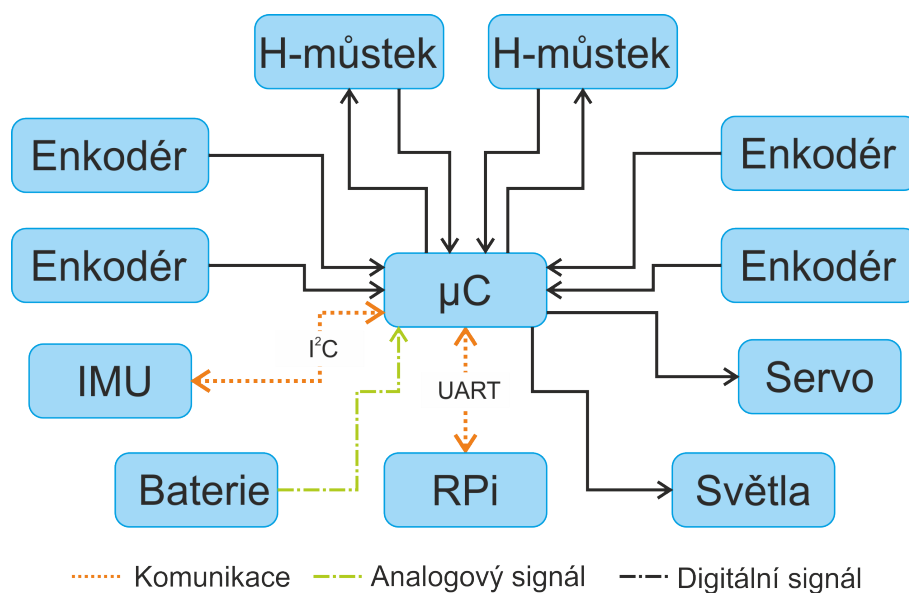
livé napěťové hladiny je na obrázku 4.11. Přítomnost jednotlivých napětí je indikována pomocí LED v pravém horním rohu. Dále je v horní části konektor pro připojení světla a drážka pro vedení plochého kabelu ke kameře. Nachází se zde také dělič napětí, přes který je měřeno napětí na baterii.



Obrázek 4.11: Schéma zapojení měničů a komponent

V prostřední části se nachází IMU, spojená s mikrokontrolérem pomocí I²C sběrnice a dvojice H-můstků DRV8833 od Texas Instruments. Jde o dvojité H-můstky, které umožňují řídit dva stejnosměrné motory s permanentními magnety a dále disponují možností nastavitelného proudového omezení pomocí externího rezistoru. Aby nedocházelo k přetěžování motoru, byl nastaven proudový limit na 0,7 A.

Po bocích se nachází svorkovnice pro připojení motorů s enkodéry.



Obrázek 4.12: Schéma propojení sběrnic a signálů

Ve spodní části se na levé straně nachází pinové lišty pro připojení tří servo motorů, tři analogových vstupů a resetovací tlačítko. Uprostřed je samotný mikrokontrolér a programovací Single Wire Debug (SWD) konektor. V pravé části je tranzistor sloužící k programovému zapnutí a vypnutí RPi a paralelně zapojený přepínač umožňující manuální spínání. Dále trojice LED, dvě slouží k indikaci posílání a přijímání dat přes sériovou linku vyvedenou na USB konektor a třetí je programově ovládaná. Na okraji je micro USB B konektor, který slouží pro komunikaci s mikrokontrolérem přes sériovou linku a nahrávání programů.

U spodní hrany je vyvedeno všech 40 pinů RPi. Na desce se ještě nachází vyvedené kontakty sběrnic SPI a I²C mikrokontroléru.

Všechny vstupně výstupní piny, u kterých hrozí riziko dotyku uživatele, jsou chráněny Electrostatic discharge (ESD) ochranami.

Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a RPi byla použita sběrnice Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART). V případě potřeby je možno jednotky propojit také pomocí I²C nebo SPI.

Schéma propojení jednotlivých komponent prostřednictvím sběrnic a analogových a digitálních signálů je zobrazeno na obrázku 4.12.

Popis SW

Úkolem programu na mikrokontroléru je provádění rychlostní regulace motorů, čtení dat z IMU, enkodérů, napětí baterie a ovládání výstupních periférií, kterými jsou manipulátor a světla.

K výměně dat s RPi byla využita knihovna `rosserial`, která pracuje se standardními zprávami používanými v rámci frameworku ROS. Díky tomu nebylo potřeba vytvářet vlastní komunikační protokol a je zajištěna kompatibilita v rámci ROS.

K regulaci rychlosti motorů byly použity čtyři empiricky naladěné PI regulátory běžící na frekvenci 100 Hz. Vstupem do těchto regulátorů je regulační odchylka daná rozdílem požadované úhlové rychlosti jednotlivých kol a jejich měřenou úhlovou rychlostí.

Požadovaná úhlová rychlost kol se spočítá na základě translační a rotační rychlosti požadované návštěvníkem nebo plánovačem trajektorie při autonomním pohybu dle vztahů 4.8 a 4.9. Tyto vztahy vychází z inverzní kinematiky modelu diferenciálně řízeného podvozku. Vliv smýkání kol po povrchu je zahrnut pouze ve vztazích pro dopřednou kinematiku. Odvození inverzní kinematiky s uvažováním vlivu smýkání je příliš komplikované, a proto byla použita

zjednodušená varianta, více v [4].

$$\omega_{rr} = \frac{2v_r - \omega_r h}{2r} \quad (4.8)$$

$$\omega_{lr} = \frac{2v_r + \omega_r h}{2r} \quad (4.9)$$

- v_r Požadovaná translační rychlost robotu
- ω_r Požadovaná úhlová rychlost robotu
- ω_{rr} Požadovaná úhlová rychlost kol na pravé straně robotu
- ω_{lr} Požadovaná úhlová rychlost kol na levé straně robotu
- r Poloměr kol
- h Rozchod kol

Skutečná úhlová rychlost kola se spočítá na základě jeho natočení určeného z počtu impulsů enkodéru. Bohužel zvolený mikrokontrolér nemá HW periférii pro zpracování údajů z enkodérů, proto bylo nutné udělat toto zpracování softwarově s využitím funkce přerušení, která je volána na obě hrany obou kanálů enkodéru. Spočítané natočení je poté filtrováno pomocí exponenciálního filtru a následně je provedena numerická derivace k získání úhlové rychlosti.

4.5 Baterie

Jako zdroj energie pro funkci robotu byly zvoleny Li-Ion akumulátory rozměru 18650 z důvodu jejich vysoké energetické hustoty, příznivé ceny a snadné dostupnosti. Aby bylo možné určit kolik je zapotřebí jednotlivých článků, je nutné nejdříve spočítat celkový příkon elektroniky.

4.5.1 Energetická bilance

V následující tabulce 4.1 je shrnuto, jaký příkon mají jednotlivé komponenty spolu s uvažovanou pravděpodobnou dobou jejich používání.

Komponenta	Napětí U [V]	Proud I [A]	Příkon P [W]	Doba využití τ [%]	Příkon P_τ [W]
Motory	6	0,7	4,20	40	1,68
Servo	6	0,08	0,48	5	0,02
Raspberry Pi	5	0,9	4,50	100	4,50
Světla	3,3	0,1	0,33	15	0,05
Hallovy senzory	3,3	0,03	0,10	100	0,1
IMU	3,3	0,006	0,02	100	0,02
MCU	3,3	0,015	0,05	100	0,05
Součet			9,62		6,42

Tabulka 4.1: Výpočet celkového příkonu

Jelikož všechna elektrická energie z baterie prochází přes měniče a stabilizátory, započítají se k celkovému příkonu ještě ztráty o velikosti 15 %. Dále tedy budeme počítat s příkonem 7,38 W.

Pro baterii byly pořízeny akumulátory ACCU-INR18650-3.35, které v době nákupu disponovali nejlepší cenou za jednu Ah. Tyto akumulátory mají nominální kapacitu C_{nom} 3,35 Ah a nominální napětí U_{nom} 3,63 V. Při požadavku toho, aby robot vydržel nabitý po celou otevírací dobu t , tedy osm hodin. Vychází potřebný počet článků následovně.

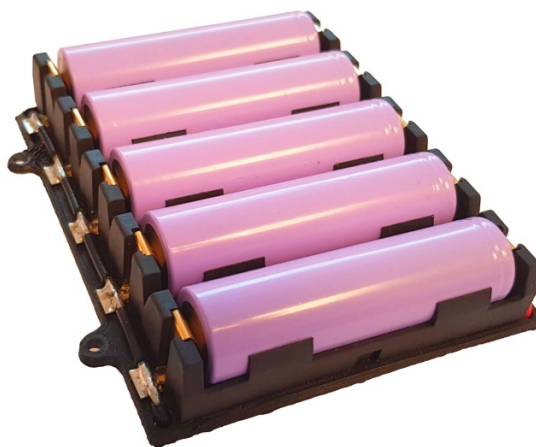
$$n_{el} = \frac{P_{\tau} t}{C_{nom} U_{nom}} = \frac{7,38 \cdot 8}{3,35 \cdot 3,63} = 4,86 \quad (4.10)$$

Z rovnice 4.10 vyplývá, že minimální potřebný počet článků je pět. S ohledem na minimalizaci rozměrů robotu, byl tento počet zvolen i jako skutečný.

V závislosti na způsobu používání se může stát, že dojde k vybití baterie dříve. V tomto případě je možné, aby se robot zajel dobít. Případně se robot může sám jezdit dobíjet v případě nečinnosti návštěvníků.

4.5.2 Provedení

Baterie robotu byla navržena tak, aby se jednalo o samostatný celek, který v sobě obsahuje veškerou elektroniku a dal by se využít i v ostatních projektech, viz obrázek 4.13.

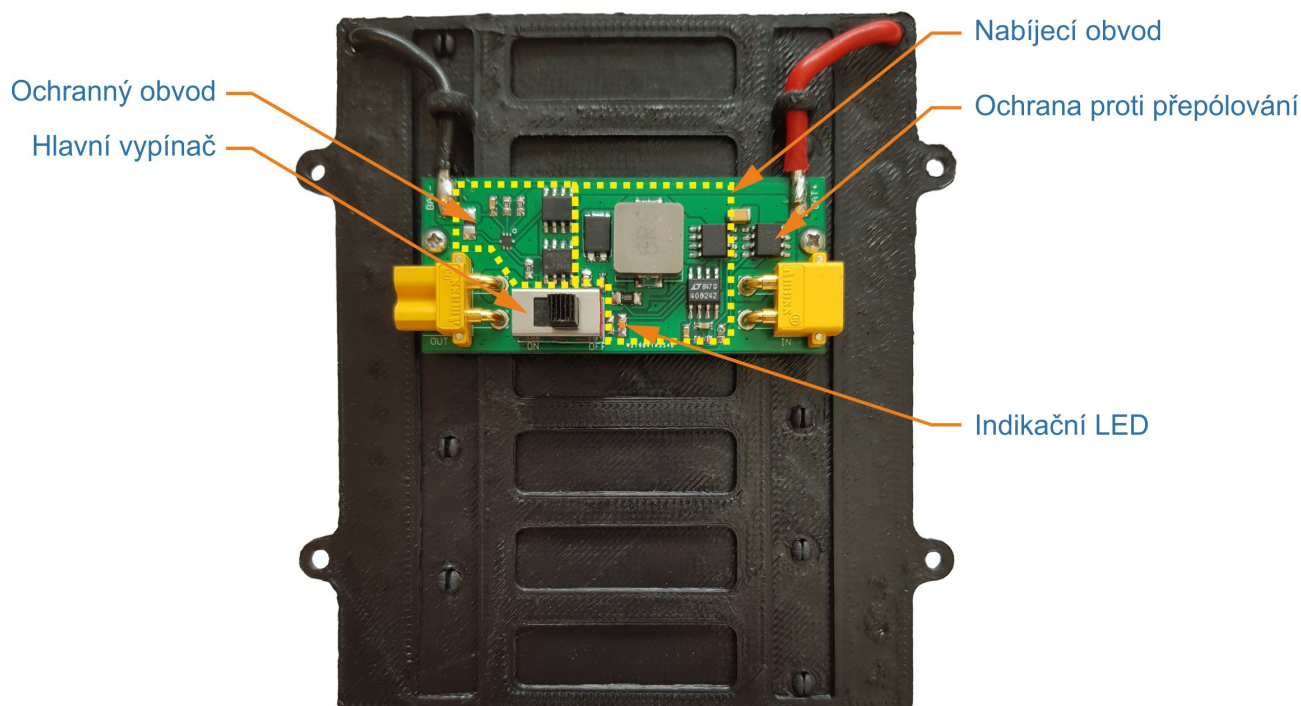


Obrázek 4.13: Baterie

Jelikož maximální velikost elektrického napětí použitého v elektronice robotu je šest voltů, bylo zvoleno, že články budou uspořádány paralelně. S tím souvisí i fakt, že v této konfiguraci není potřeba při nabíjení provádět vyvažování jednotlivých článků. Díky využití akumulátorů v rozměru 18650, je možné využít i standardní držáky pro tyto články, což výrazně usnadní jejich výměnu v případě poškození nebo stárnutí. Tyto držáky jsou zacvaknuty do nosného prvku vytištěného na 3D tiskárně. Na druhé straně nosného prvku se nachází elektronika. Baterie je k rámu robotu upevněna pomocí distančních sloupků.

Elektronika osazená na baterii slouží k nabíjení článků a jejich ochraně. Obě části jsou umístěny na jedné Desce Plošných Spojů (DPS) zobrazené na obrázku 4.14.

V pravé části desky se nachází nabíjecí obvod, který je postaven kolem integrovaného obvodu LTC4002-4.2. Tento obvod umožňuje, použít vstupní napětí v rozsahu 4,7 až 22 V a nastavení



Obrázek 4.14: Elektronika baterie

nabíjecího proudu pomocí bočníku. Elektronika je navržena na vstupní napětí 12 V a nabíjecí proud je nastaven na 5 A. Tato hodnota proudu vychází z doporučení výrobce, který uvádí standardní nabíjecí proud na jeden článek 975 mA. Nabití vybité baterie trvá přibližně 3,5 h. Tato doba se může měnit v závislosti na tom, zda je k baterii připojena i další elektronika.

Na vstupu je použit tranzistor jako ochrana proti přepólování.

V levé části se nachází hlavní vypínač spolu se signalizací nabíjení a ochranou baterie. Ochranný obvod využívá integrovaný obvod BQ2980, který zajišťuje ochranu proti přepětí, podpětí, přehřátí a nadproudu při nabíjení a vybíjení.

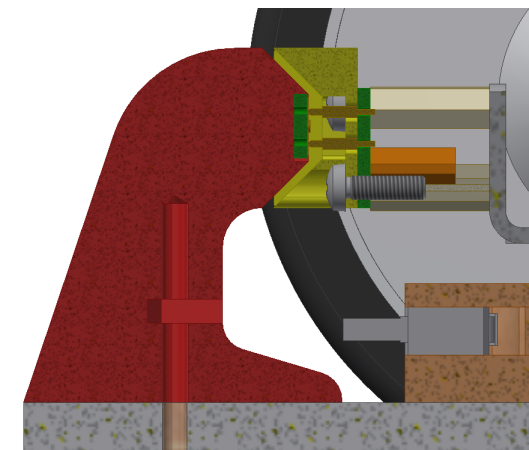
5 Nabíjecí stanice

Nabíjecí stanice, jak už název napovídá, slouží k nabíjení baterie nacházející se uvnitř robotu. Mimo to, také slouží k navedení robotu k nabíjecímu konektoru a monitorování nabíjecího procesu. Robot do stanice zajíždí v autonomním režimu, jsou v ní proto udělána opatření, která mají za cíl usnadnit najetí robotu a eliminovat nepřesnosti v jeho navigaci a lokalizaci.

5.1 Mechanická konstrukce

Jelikož se nabíjecí konektor nachází v zadní části robotu, je nutné, aby do stanice zacouval. Tento proces s sebou, ale přináší tu nevýhodu, že se robot bude při couvání vzdalovat od jakékoli referenční značky kterou před sebou uvidí, a tím bude klesat přesnost odhadu jeho polohy. Z těchto důvodů byla na stanici udělána řada opatření, které mají tento úkol zjednodušit.

Mechanická konstrukce stanice je vyrobena z plátů překližky a plexiskla řezané na laserové řezačce. Spodní, vrchní, zadní vnitřní a vnější stěny jsou vyrobeny z 6mm dubové překližky. Vnitřní bočnice jsou vyrobeny z plexiskla tloušťky 5 mm, aby poskytovaly hladký povrch, o který se může robot při zajíždění třít. Stěny jsou vzájemně pospojovány lepenými čepovými spoji. V zadní části vjezdu do stanice se nachází vytištěný nabíjecí sloupek, na kterém je umístěna DPS s kontaktními ploškami S70-332002045R od HARWINu, na které dosedají kontakty nabíjecího konektoru robotu, viz kapitola 4.2.3. Zároveň je funkční část nabíjecího sloupku tvarována tak, aby zapadala do nabíjecího konektoru robotu, jak je ukázáno na obrázku 5.1.



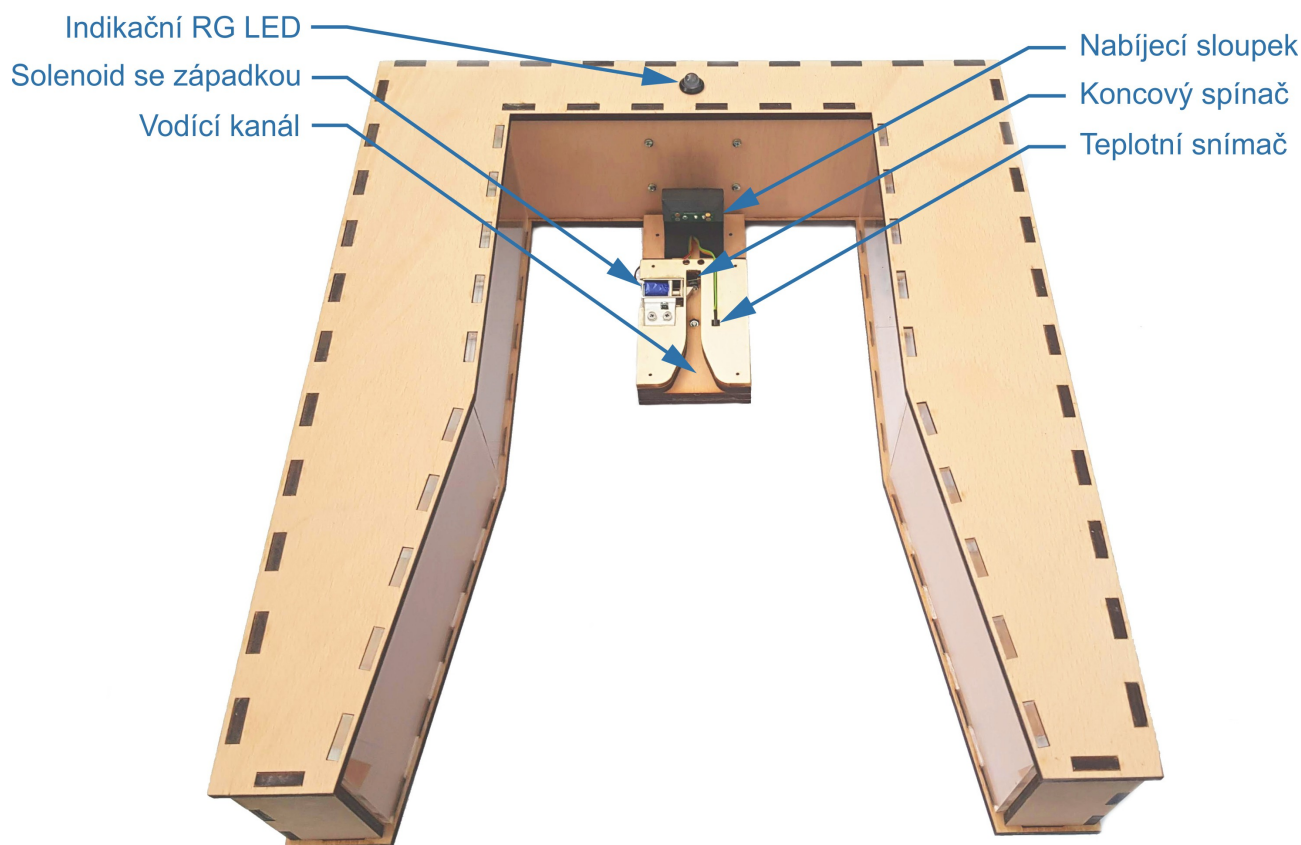
Obrázek 5.1: Nabíjecí sloupek s konektorem

Nabíjecí stanice má v přední části rozšíření, svírající s osou stanice úhel 10° . Toto rozšíření slouží k navedení robotu do stanice v případě, že se nachází mimo její osu nebo je vůči ní natočen. Během této fáze se robot smýká svou horní dřevěnou deskou o stěny stanice.

Následně se robot dostane do části, jejíž stěny jsou již rovnoběžné a mezi nimi se nachází vodící kanál, sloužící k přesnějšímu navedení. Do tohoto kanálu zapadá čep, nacházející se zespodu v zadní části robotu. Na konci kanálu se nachází koncový spínač, signalizující úspěšné

zajetí, a západka ovládaná solenoidem. Tato západka má svou šikmou stranu nasměrovanou ven ze stanice, při zajíždění vodící čep stlačí západku, až se čep dostane ke koncovému spínači, uvolní západku. Západka je zde použita z toho důvodu, aby zabránila pohybu robotu vpřed. Neboť odpružené kontakty na nabíjecím konektoru robotu v kombinaci s vůlí v převodovce motorů, způsobují odtlačování robotu od nabíjecího sloupku.

Celkový pohled na stanici je na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Pohled na nabíjecí stanici

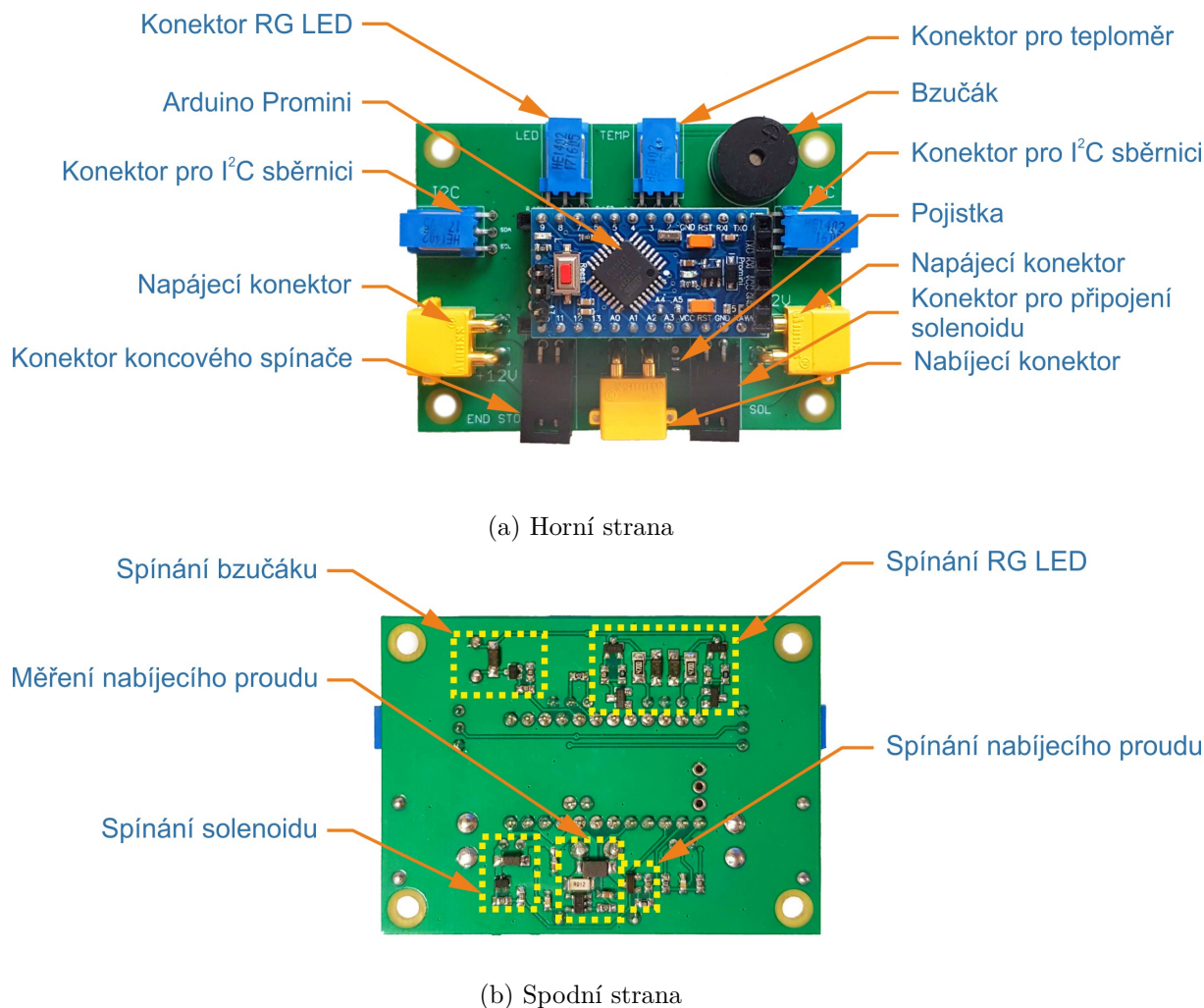
5.2 Elektronika

Z pohledu elektroniky je nabíjecí stanice navržena tak, aby bylo možné propojit více stanic sériově, v případě, že bude použito více robotů v exponátu. Elektronika musí dále zajistit sledování nabíjecího procesu a komunikaci v rámci prostředí ROS.

Z výše uvedených požadavků bylo zvoleno řešení, kdy RPi, umístěná v nabíjecí stanici, obstarává komunikaci s prostředím ROS a zároveň komunikuje s mikrokontroléry v jednotlivých nabíjecích stanicích, které mají na starost proces nabíjení. Jako mikrokontrolér pro nabíjecí stanici byla zvolena 8bitová ATmega328P osazená na vývojové desce Arduino Promini. Spojení mikrokontroléru a RPi je realizováno prostřednictvím sběrnice I²C, což umožní řetězit stanice za sebe bez nutnosti přidávat další kabely.

Pro mikrokontrolér byla vytvořena rozšiřující DPS, do které je osazen, viz obrázek 5.3a. Tato rozšiřující deska slouží k propojení jednotlivých stanic sběrnici I²C a 12V napájením.

Dále slouží k připojení periférií dobíjecí stanice jako jsou solenoid, teplotní snímač DS18B20, koncový spínač, nabíjecí konektor a indikační RG LED. V neposlední řadě disponuje deska měřením nabíjecího proudu pomocí bočníku a zesilovače INA180, zvukovou signalizací v podobě elektromagnetického bzučáku a tavnou pojistkou na vstupní 12V lince. Jednotlivé části jsou zobrazeny na obrázcích 5.3a a 5.3b.



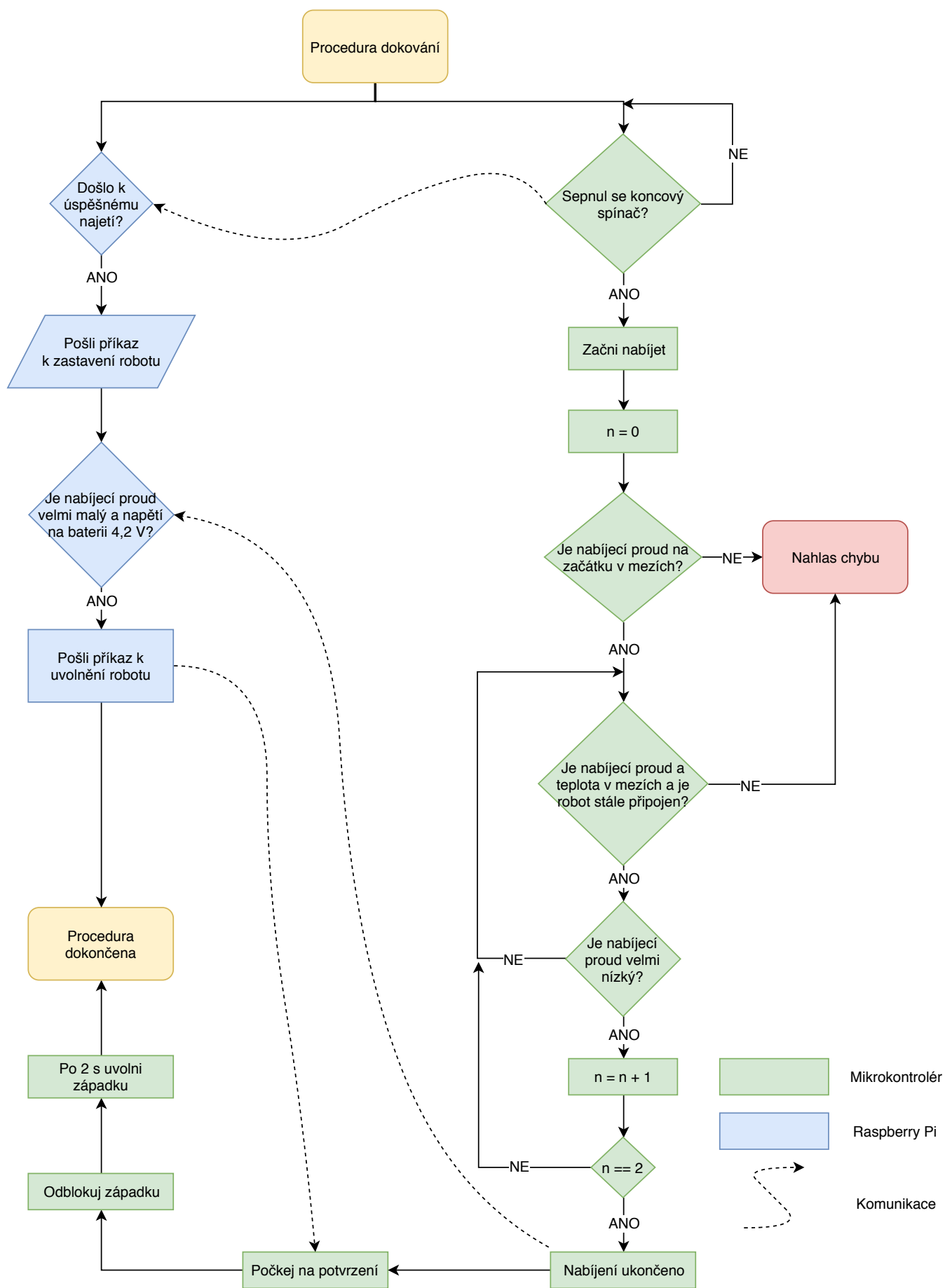
Obrázek 5.3: Řídicí jednotka nabíjecí stanice

5.2.1 Proces nabíjení

Proces nabití robotu do nabíjecí stanice a proces nabíjení je z pohledu RPi a mikrokontroléru zobrazen ve vývojovém diagramu 5.4.

Stav nabití baterie robotu je určován z měření jejího napětí pomocí mikrokontroléru na podřazené řídicí jednotce. Jakmile klesne hodnota napětí na 3,3 V, přejde robot do režimu autonomní jízdy k nabíjecí stanici. Po zajetí do nabíjecí stanice a sepnutí koncového spínače je z RPi na stanici dán příkaz k zastavení robotu. Podřazená řídicí jednotka při nabíjení neustále měří napětí na baterii, které je přeposíláno do nabíjecí stanice. Když dosáhne hodnota napětí na baterii 4,2 V a nabíjecí proud je již velmi malý. Dojde k ukončení nabíjení a uvolnění robotu ze stanice.

V diagramu je ještě doplněna podmínka opětovného začátku nabíjení v případě, že je nabíjecí



Obrázek 5.4: Vývojový diagram procesu nabíjení baterie robotu

proud velmi malý. Tato podmínka je zde z toho důvodu, neboť nabíjecí obvod LTC4002-4.2 má v sobě integrovaný bezpečnostní časovač, který nabíjení zastaví, pokud po uplynutí tří hodin je napětí na baterii vyšší než 4.05 V. Aby došlo k opětovnému zahájení nabíjení, je nutné odpojit vnější zdroj napětí pomocí tranzistoru na řídicí jednotce a znovu jej připojit.

Jednotlivé stavy, ve kterých se může nabíjecí stanice nacházet jsou indikovány pomocí RG LED umístěné ve středu stanice. Při klidovém stavu svítí zeleně a během nabíjení oranžově. V případě nadproudu nebo zvýšení teploty při nabíjení začne červeně blikat, zároveň se zapne bzučák a odpojí se nabíjecí proud pomocí tranzistoru.

6 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní slouží pro interakci návštěvníka exponátu s mobilním robotem. Rozhraní by mělo být dostatečně intuitivní, aby i mladý návštěvník byl schopen pochopit, jak robot ovládat a jaké jsou jeho možnosti, bez nutnosti číst návody. Dále musí být atraktivní, aby dokázalo upoutat pozornost. Mělo by mít i vzdělávací prvky. A v neposlední řadě také originální, aby dokázalo udržet pozornost návštěvníků.

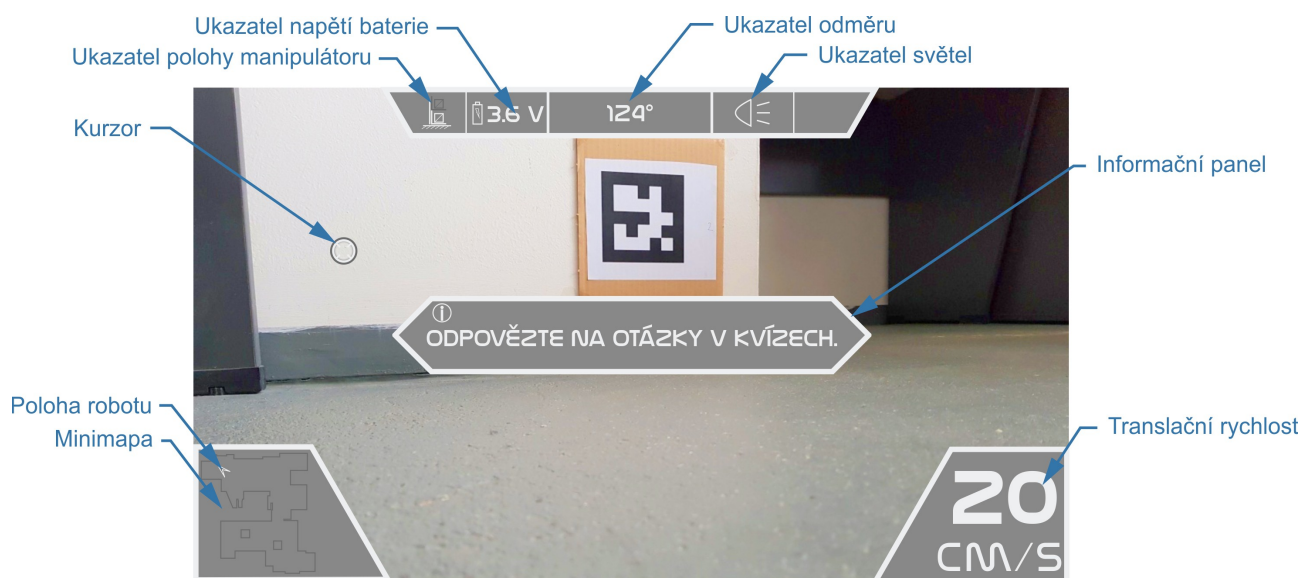
6.1 Popis uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní bylo navrhováno tak, aby se podobalo rozhraním z počítačových her a herních automatů. S cílem využít obdobné mechanismy, aby si návštěvník velmi rychle na dané rozhraní zvykl.

Rozhraní se skládá ze vstupních periferií a výstupu v podobě monitoru a reproduktorů. Obě části budou v další pasáži popsány.

6.1.1 Výstupy

Výstupy uživatelského rozhraní jsou zobrazovány na monitoru a přehrávány z reproduktorů. Na obrázku 6.1 je zobrazeno grafické uživatelské rozhraní zobrazované na monitoru, takzvaný Head Up Display (HUD).



Obrázek 6.1: Grafické uživatelské rozhraní

Na obrázku 6.1 je v levém dolním rohu zobrazena minimapa s půdorysem mechatronické laboratoře, ve které probíhalo testování. V této minimapě je zobrazena šipka reprezentující



Obrázek 6.2: Ovládací krabička

polohu a natočení robotu.

V pravém dolním rohu se nachází ukazatel translační rychlosti. Aby byla rychlost zobrazena jako celé číslo rozumné velikosti, byla zvolena jednotka cm/s .

V horní části je lišta zobrazující ukazatel polohy manipulátoru, hodnotu elektrického napětí na baterii, odměr robotu neboli jeho natočení vůči zvolenému globálnímu souřadnému systému a ukazatel zapnutých nebo vypnutých světel. V horní liště je na pravé straně volné pole, které může být použito k zobrazení doplňujících informací z miniher nebo volbu jazyka.

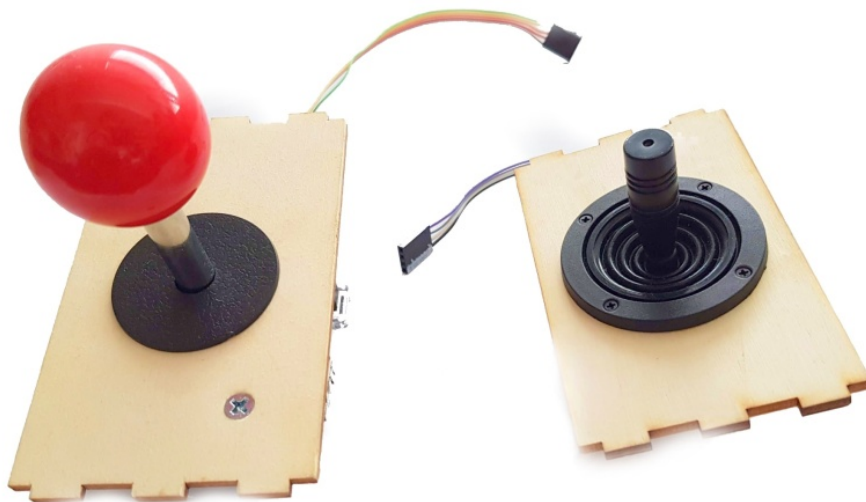
V ploše se poté nachází kurzor. Je zde také zobrazen vyskakovací informační panel. Který se zobrazí při určité události vyvolané minihrou nebo při stlačení tlačítka. Tento panel sám zmizí po určité době.

6.1.2 Vstupy

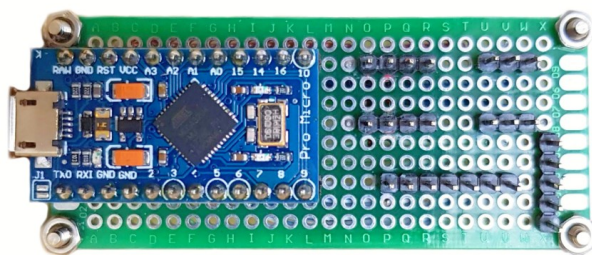
Vstupy do uživatelského rozhraní jsou realizovány pomocí tlačítek a joysticků, ať už analogových nebo využívajících mikrospínače. Za tímto účelem byla vytvořena testovací ovládací krabička zobrazená na obrázku 6.2. Tato krabička je vytvořena z topolové překližky tloušťky 3 mm vyřezané na laserové řezačce. Stěny krabičky jsou spojeny pomocí lepených čepových spojů. Vrchní stěna není přilepená, ale umožňuje vkládání různých ovládacích prvků na různé pozice, za účelem zjištění jejich vhodného uspořádání, které by vyhovovalo nejvíce návštěvníkům. Celkem byly vyzkoušeny dva typy analogových joysticků a dva typy joysticků s mikrospínači (viz obrázky 6.2 a 6.3).

Rozvržení, které se používalo nejčastěji je na obrázku 6.2, kdy v levé části je umístěn analogový joystick k řízení robotu, v pravé části je joystick s mikrospínači a dvěma tlačítky a mezi nimi je panel s tlačítky. Rozvržení odpovídá rozvržení ovládacích prvků při hraní počítačových her, kdy levá ruka zpravidla slouží k ovládání pohybu postavy nebo řízení a pravá ruka k míření a pohybu kurzorem. Na panelu jsou tlačítka pro zapnutí/vypnutí světel, pohyb manipulátoru, zobrazení informačního panelu a změnu jazyka prostředí. V současné době je možno přepínat mezi českým a anglickým jazykem.

Analogový joystick je použit z důvodu možnosti spojitého řízení rychlosti robotu, což je



Obrázek 6.3: Joystick s mikropsínači a analogový joystick



Obrázek 6.4: Mikrokontrolér s rozšiřující deskou v ovládací krabici

výhodné u určitých miniher, kde je nutné přesné řízení pohybu robotu. U ovládání pohybu kurzoru na obrazovce byl používán joystick jak analogový, tak s mikropsínači. Zde závisí na preferencích konkrétního hráče.

Pro propojení ovládací krabice s počítačem byl zvolen mikrokontrolér ATmega32u4 na vývojové desce Arduino Pro Micro. Tento mikrokontrolér má nativní podporu USB periferie a je možné jej naprogramovat tak, aby se choval jako herní ovladač nebo klávesnice. Vývojová deska je přidělána na rozšiřující pájivé pole, které slouží k připojení ovládacích prvků (viz obrázek 6.4). Analogové joysticky jsou namapovány jako joysticky herního ovladače a zbylé prvky jako tlačítka klávesnice, aby bylo možné testovat funkcionalitu prostředí i bez ovládací krabice.

To, že je ovládací krabice připojována jako herní ovladač a klávesnice, má řadu výhod. Hlavní výhodou je, že není potřeba vytvářet komunikační protokol mezi počítačovou aplikací a ovladačem. Dále to, že s minimálními úpravami prostředí je možné použít jakýkoli herní ovladač k jeho ovládání.

6.2 Prvky rozšířené reality

K lokalizaci robotu v prostředí jsou využity referenční značky ArUco [27], [28]. Tyto značky slouží k určení relativní polohy kamery vůči značce a jejich použití výrazně usnadňuje implementace generování, rozpoznávání a odhad jejich pozice v knihovně OpenCV [29]. Při znalosti

prostředí se dají tyto značky využít pro určení absolutní pozice, více o lokalizaci robotu s využitím těchto značek je v [4].

Jinou možností, jak využít tyto značky nejen k lokalizaci, je využít je pro zobrazení rozšířené reality Augmented Reality (AR). Díky rozšířené realitě můžeme do prostředí exponátu přidat prvky, které by nebylo možné do exponátu fyzicky přidat nebo by to bylo velmi nákladné. Příkladem mohou být 3D modely průzkumných vozítek, které byly použity při objevování planety Mars.

Dále lze rozšířenou realitu využít pro zobrazování videí, informačních popisků nebo kvízů. Výhodou je, že se jedná pouze o textury, proto je možné je velmi snadno aktualizovat a měnit. Zároveň je možné měnit jazyk, ve kterém jsou prvky zobrazovány, bez nutnosti používat dvojjazyčné popisky nebo titulky ve videu.

V současném stavu je v AR implementováno zobrazení obrázků, videí, kvízů, statických 3D modelů a možnost interakce s jednotlivými prvky. Tyto prvky je možno polohovat a natáčet vzhledem ke značce. Dále byla implementována možnost vytvořit ze značek krychli, kdy každé značce je přiřazen k zobrazení stejný prvek, který je natočen a posunut takovým způsobem, že při otáčení krychle můžeme vidět daný prvek ze všech stran.

6.3 Provedení grafického rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní, které můžete vidět na obrázku 6.1 bylo naprogramováno v jazyce Python s využitím knihovny pro OpenGL GLFW [30], která se stará o tvorbu oken a čtení uživatelských vstupů. Dále jsou využity knihovny OpenCV a PIL pro práci s obrazem, PyGame pro přehrávání zvuků a Numpy a GLM pro maticové a vektorové operace. Nedílnou součástí je knihovna rospy, která umožňuje přijímání a odesílání zpráv v rámci prostředí ROS.

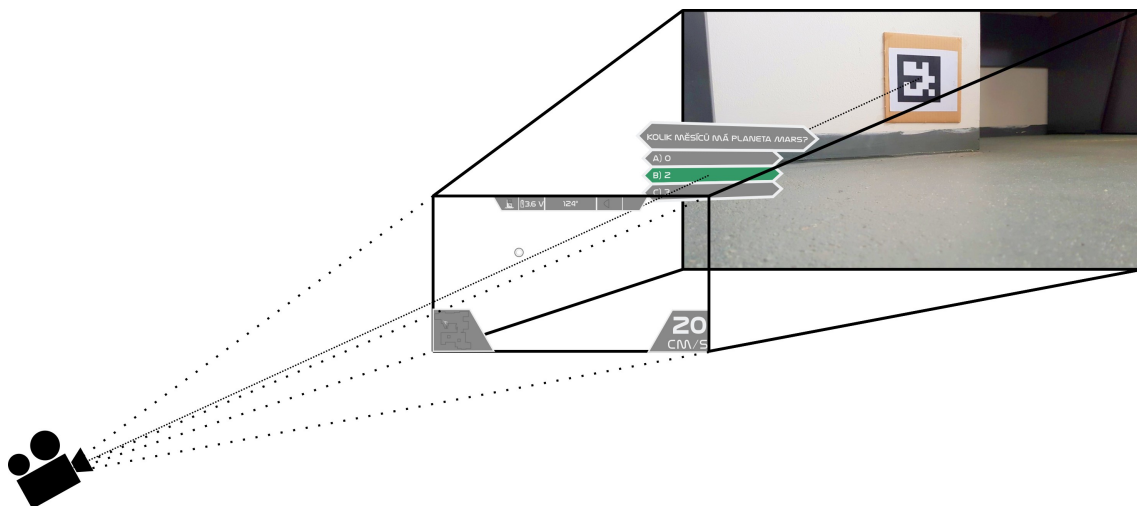
6.3.1 Vykreslování rozšířené reality

Prvním krokem při vykreslování AR je nalezení referenční značky v obraze, který je přes Transmission Control Protocol (TCP) přijímán z robotu. K tomu je využita funkce v rámci knihovny OpenCV. Tím získáme souřadnice rohů značky v obraze a její ID, kdy každá značka je unikátní a má přiřazené své ID.

Při jízdě robotu dochází k vibracím kamery, což se projevuje v rozmazání obrazu a následné neschopnosti algoritmu správně rozpoznat značku a vykreslit daný AR prvek. Další nežádoucí jev se projevuje také při vibracích a u vzdálených značek, kdy dochází k náhlým změnám natočení zobrazovaného objektu. Vyskytuje se hlavně u značek, které jsou čelně natočeny ke kameře, kdy v této poloze je odhad jejich natočení nejméně přesný, více v [4]. Z těchto důvodů byly použity dva jednoduché mechanismy, které tyto nežádoucí jevy omezují.

Prvním opatřením je použití plovoucího průměru na hodnoty získaných souřadnic rohů značky, čímž se snižují náhlé změny polohy a natočení.

Další opatření spočívá v zaznamenávání jednotlivých výskytů značek a počítání relativní četnosti výskytu za určitý počet snímků. Pokud je určitá značka v obraze nalezena, je tato informace uložena a prvek, který značka reprezentuje je zobrazen. Pokud značka v obraze nalezena není, ale její relativní četnost výskytu v posledních několika snímcích je větší než daná mez, tak je značka zobrazena a využijí se její poslední známé souřadnice rohů. Z podstaty metody plyne, že pokud značku v obraze delší dobu vidíme a najednou ji odstraníme, tak bude trvat určitou dobu, než její relativní četnost výskytu klesne pod určitou mez a prvek, který



Obrázek 6.5: Princip vykreslování obsahu

reprezentuje přestane být zobrazován. Existuje zde tedy určité zpoždění, které ale nijak neruší a naopak napomáhá lepšímu zážitku z AR, jelikož nedochází k problikávání zobrazovaných prvků.

Na základě polohy rohů značky v obraze, velikosti značky a známých parametrů kamery (více o kalibraci kamery a jejích parametrech v [4]) můžeme odhadnout jejich polohu v prostoru vzhledem ke kameře. K tomu se opět využije standardní funkce OpenCV. Výstupem funkce jsou translační a rotační vektory jednotlivých značek detekovaných v obraze. Následně se pomocí Rodriguesova vztahu převede získaný rotační vektor na rotační matici. Tato rotační matice se spojí s translačním vektorem do podoby transformační matice.

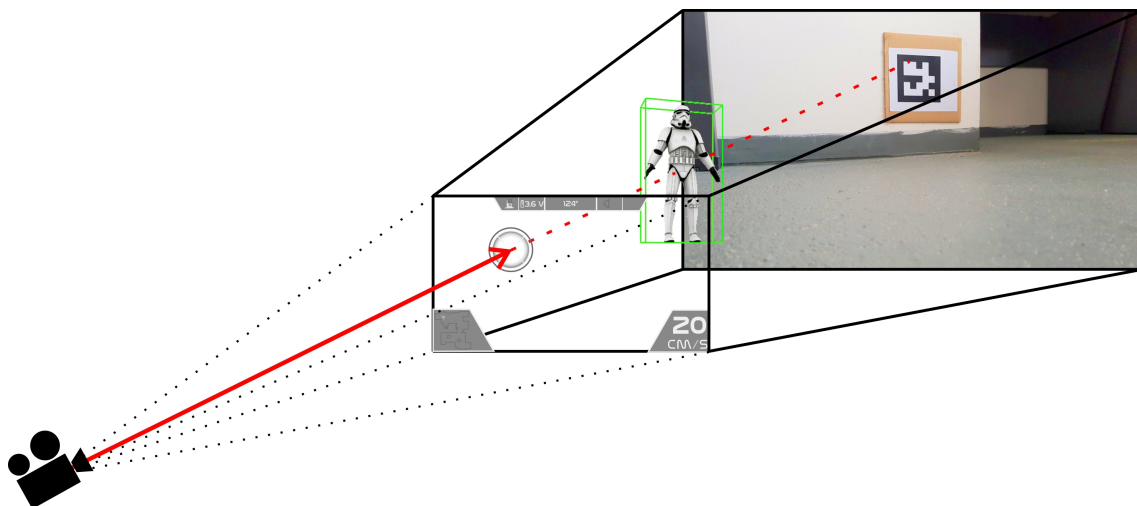
Samotné vykreslení se provádí pomocí OpenGL, které představuje rozhraní pro vykreslování obsahu s pomocí grafické karty. Při tvorbě Graphical User Interface (GUI) bylo využito verze OpenGL předcházející verzi 3.0, označované také jako Legacy OpenGL. Tato verze oproti novějším sice nenabízí takové možnosti ovlivňování vykreslovacího procesu a práce s grafickou kartou, na druhou stranu je mnohem snadněji použitelná.

Při vykreslování obsahu se využívá perspektivní projekce, jak je ukázáno na obrázku 6.5. Nejprve je do pozadí komolého jehlanu, tvořícího zorné pole, vykreslen obraz z kamery. Následně se využije výše získané transformační matice pro nastavení správné polohy a natočení vykreslovaného objektu vůči kameře. V poslední části se v ortografické projekci vykreslí na přední stěnu komolého jehlanu HUD. Tento HUD je tvořen průhlednou texturou obsahující jednotlivé lišty pro zobrazení informací. Přes tuto texturu se vykreslují konkrétní ukazatele a minimapa s polohou robotu.

6.3.2 Interakce s prvky rozšířené reality

Důležitou částí herního prostředí je možnost interakce s jeho prvky. V popisovaném případě je interakce realizována prostřednictvím kurzoru pohybujícího se po obrazovce. Z čehož plyne, že musíme vědět, jestli daný kurzor na něco míří nebo ne. Základní metodou, která se k tomuto účelu používá je metoda běžně označovaná jako *raycast* [31]. Podstata spočívá ve vyslání paprsku z kamery přes kurzor na obrazovce do virtuálního prostoru, jak je zobrazeno na obrázku 6.6. A následného zjišťování, jestli paprsek do něčeho narazil nebo ne.

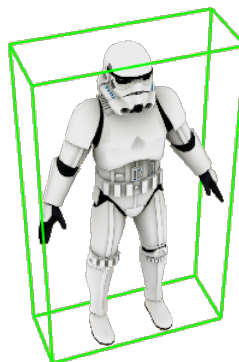
To, jestli paprsek něco zasáhl, je řešením geometrické úlohy hledání průsečíku přímky a určitého objektu. Tímto objektem může být například koule opsaná danému objektu, ohraničující kvádr (běžně se používá označení bounding box) nebo jeden trojúhelník reprezentující polygon



Obrázek 6.6: Promítnutí paprsku z kamery přes kurzor



(a) AABB



(b) OBB

Obrázek 6.7: Varianty ohraničujících kvádrů

daného 3D modelu. Hledání průsečíku paprsku s koulí je poměrně jednoduché, nicméně koule jako ohraničující těleso se hodí hlavně pro objekty kulovitého nebo krychlovitého charakteru. V případě dlouhých nebo plochých objektů je ohraničující koule již nevhodná neboť zkoumaný objekt tvoří malou část jejího objemu. Na druhou stranu, hledání průsečíku s polygony modelů je mnohem složitější a pro tuto aplikaci zbytečně přesné řešení. Optimálním řešením je použít ohraničující kvádr. V případě členitých modelů je možno použít pro jednotlivé části samostatné ohraničující kvádry.

Ohraničující kvádry neboli Bounding Boxy se nejčastěji používají ve dvou variantách a to Axis Aligned Bounding Box (AABB) a Oriented Bounding Box (OBB). Rozdíl mezi těmito variantami je ukázán na obrázku 6.7. AABB je neustále orientován tak, aby měl stěny rovnoběžné s osami souřadného systému. U tohoto přístupu je jednodušší hledání průniků, ale ve výsledku získáme mnohem větší ohraničující kvádr než u OBB, kdy dochází k natáčení kvádrů spolu s objektem. Tato varianta je také využívána ve výsledné aplikaci a postup, jak se zjišťuje průnik paprsku s OBB je popsán níže.

Cílem při zjišťování průniku paprsků s OBB je najít průsečíky t_1 a t_2 paprsku s rovinami, které procházejí rovnoběžnými stěnami OBB. Na základě vzdálenosti těchto průsečíků od počátku globálního souřadného systému O vyhodnocujeme, zda došlo k zasažení OBB nebo ne.

OBB je definován pomocí tří ortonormálních báзовých vektorů $\vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$ a hodnotami minimálních a maximálních rozměrů $BB_{xmin}, BB_{xmax}, \dots$ v jednotlivých osách vztahovaných k počátku BB_O lokálního souřadného systému OBB.

Dále máme jednotkový vektor \vec{d} , který míří z kamery nacházející se v počátku O do kurzoru na obrazovce, viz obrázek 6.6. A vektor \vec{p} , který míří z počátku O do počátku OBB BB_O .

S využitím skalárního součinu získáme hodnoty běžně označované jako e a f následovně.

$$e = \vec{a}_x \cdot \vec{p} \quad (6.1)$$

$$f = \vec{a}_x \cdot \vec{d} \quad (6.2)$$

Hodnota e vyjadřuje průmět vektoru \vec{p} do směru báзовého vektoru \vec{a}_x . Hodnota f přímo odpovídá velikosti $\cos \phi$, jelikož jsou oba vektory \vec{a}_x a \vec{d} jednotkové. Úhel ϕ se nachází také u vrcholů pravoúhlých trojúhelníků t_1 a t_2 . Z těchto pravoúhlých trojúhelníků můžeme vypočítat hledanou vzdálenost průsečíků od počátku následovně.

$$|Ot_1| = \frac{e + BB_{xmin}}{\cos \phi} \quad (6.3)$$

$$|Ot_2| = \frac{e + BB_{xmax}}{\cos \phi} \quad (6.4)$$

Grafická reprezentace postupu je ukázána na obrázku 6.8.

Postup uvedený výše se aplikuje pro jednotlivé osy x, y a z lokálního souřadného systému OBB. Pro každou osu získáme průsečíky t_1 a t_2 . Při vyhodnocování zásahu se porovnává zda nejvzdálenější průsečík t_{1i} leží k počátku O blíže než nejbližší průsečík t_{2i} .

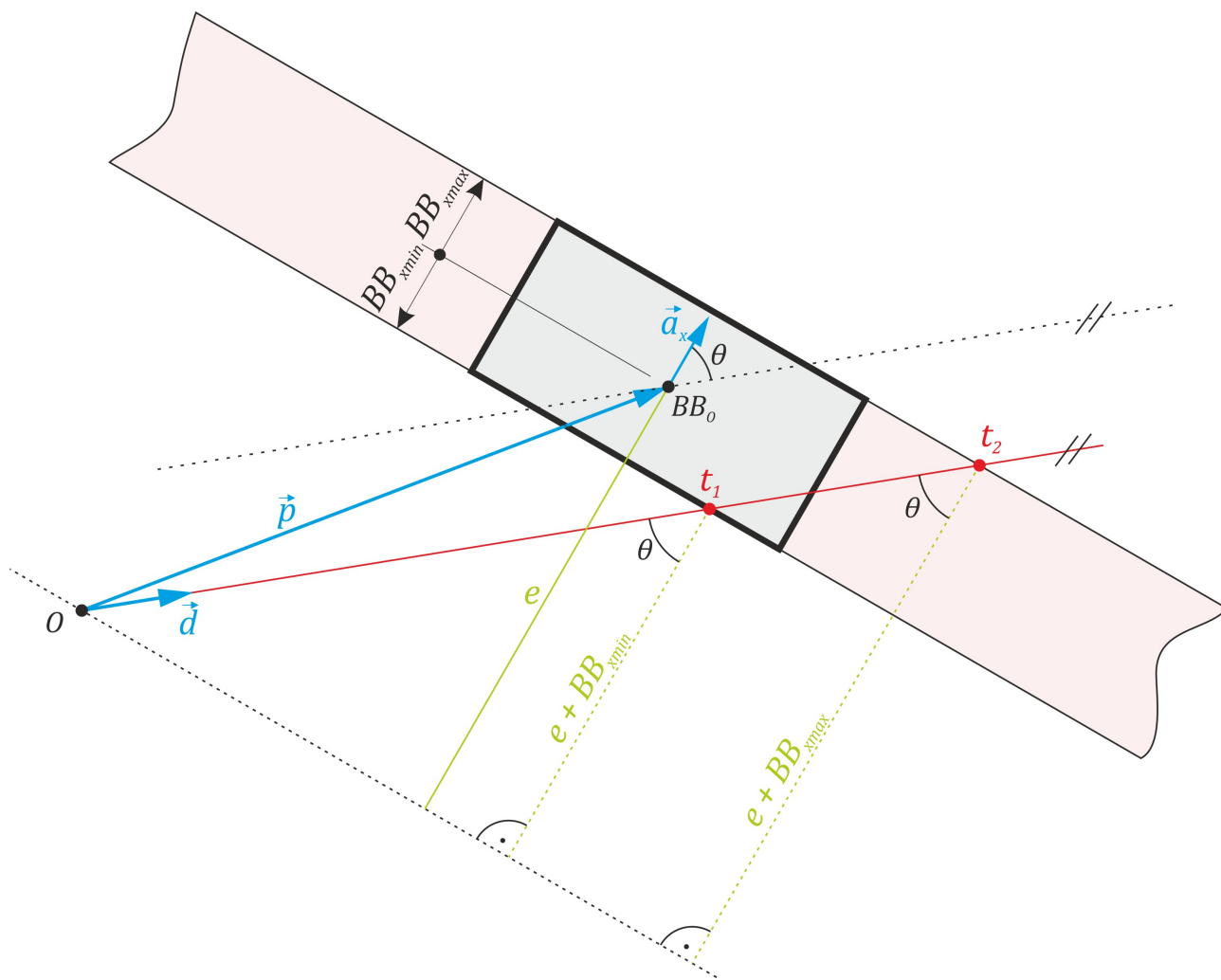
Na obrázku 6.9a můžeme vidět, že nejvzdálenější průsečík t_{1x} leží počátku blíže než nejbližší průsečík t_{2y} . Došlo tedy k zásahu.

Na obrázku 6.9b je nejvzdálenější průsečík t_{1x} od počátku dále než nejbližší průsečík t_{2y} . K zásahu tedy nedošlo.

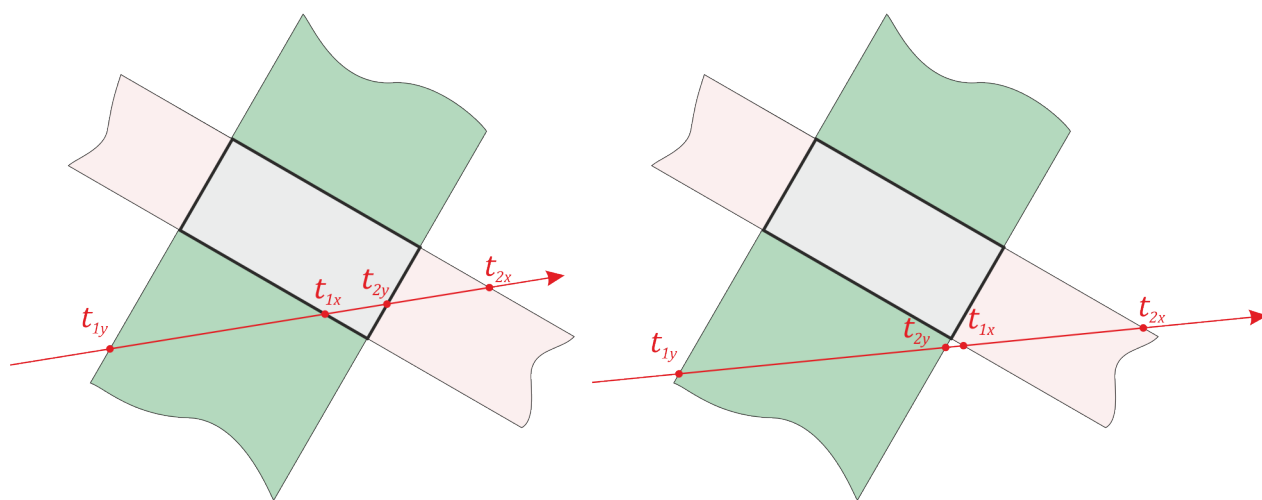
Stejný způsob, jaký je na obrázku 6.9 ukázán pro dvě osy se aplikuje i v prostoru na osy tři. Kdy se výsledek při porovnání dvou os porovná ještě s osou třetí.

Výhodou výše zmíněného postupu je, že nezávisí na poloze počátku lokálního souřadného systému BB_O vzhledem k OBB, protože vzdálenosti BB_{imin} a BB_{imax} jsou vztahovány k poloze tohoto počátku. Nacházel-li by se počátek BB_O na obrázku 6.8 mimo OBB v záporném směru vektoru \vec{a}_x . Budou obě vzdálenosti BB_{xmin} a BB_{xmax} kladné a výsledek bude stejný.

V samotném uživatelském rozhraní je tento postup aplikován u instancí objektů, u kterých bylo povoleno zjišťování zásahu. Každá tato instance vyhodnocuje, zda je na objekt namířen kurzor nebo ne. Pokud je, instance uloží do sdílené proměnné odkaz na sebe a vzdálenost od počátku, ve které byla zasažena. Následně se v hlavní smyčce vyhodnocuje, která instance byla zasažena v nejmenší vzdálenosti. Tato událost se zapíše do atributu dané instance, který vyjadřuje, zda je na ní namířen kurzor. Pokud je na ni namířen kurzor a zároveň bylo zmáčknuto tlačítko střelby, zapíše se i tato událost do jejích atributů.



Obrázek 6.8: Grafické znázornění hledání průsečíku paprsků s OBB



(a) Paprsek protíná OBB

(b) Paprsek neprotíná OBB

Obrázek 6.9: Princip vyhodnocování zásahu

6.4 Herní prvky

Všechny předchozí části uživatelského rozhraní byly zkombinovány tak, aby tvořily ucelenou hru. Za tímto účelem byl půdorys mechatronické laboratoře rozdělen na virtuální zóny zobrazené na obrázku 6.10.

Z odhadované polohy robotu, která je získávána z prostředí ROS je určováno, ve které zóně se robot nachází a podle toho se upravuje jaké úkoly má návštěvník plnit. Aby se zabránilo nežádoucím změnám příslušnosti robotu k určité zóně v případě, že se robot nachází na její hranici, obsahuje každá zóna hysterezi, zobrazena na obrázku 6.10 čárkovanou čarou. Jednotlivé hysterezní pásma se překrývají, aby se robot vždy v nějaké zóně nacházel.

Při každé změně zóny se na HUD zobrazí informační panel s instrukcemi k danému úkolu. Při splnění úkolu se opět zobrazí informační panel s informací o jeho splnění a dalšími instrukcemi. Informační panel může být vyvolán také manuálně pomocí tlačítka na ovládací skříňce.

V hlavní smyčce programu se vyhodnocují dané úlohy podle zóny, ve které se robot nachází.

Zóna 0

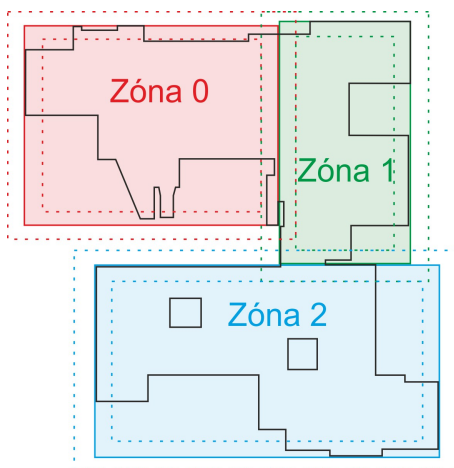
V zóně nula je návštěvníkovým úkolem sestřelit roboty pomocí kurzoru na obrazovce, viz obrázek 6.11. Každý robot je vytvořen jako samostatná instance a zobrazován u dané referenční značky. Pokud dojde k jeho sestřelení, přestane se již vykreslovat. Po sestřelení všech robotů je zobrazen informační panel oznamující splnění úkolu a nabádá uživatele k přesunu do další zóny. Při opuštění zóny dojde k resetování úkolu, kdy se robotům změní atribut, že byli sestřeleni.

Zóna 1

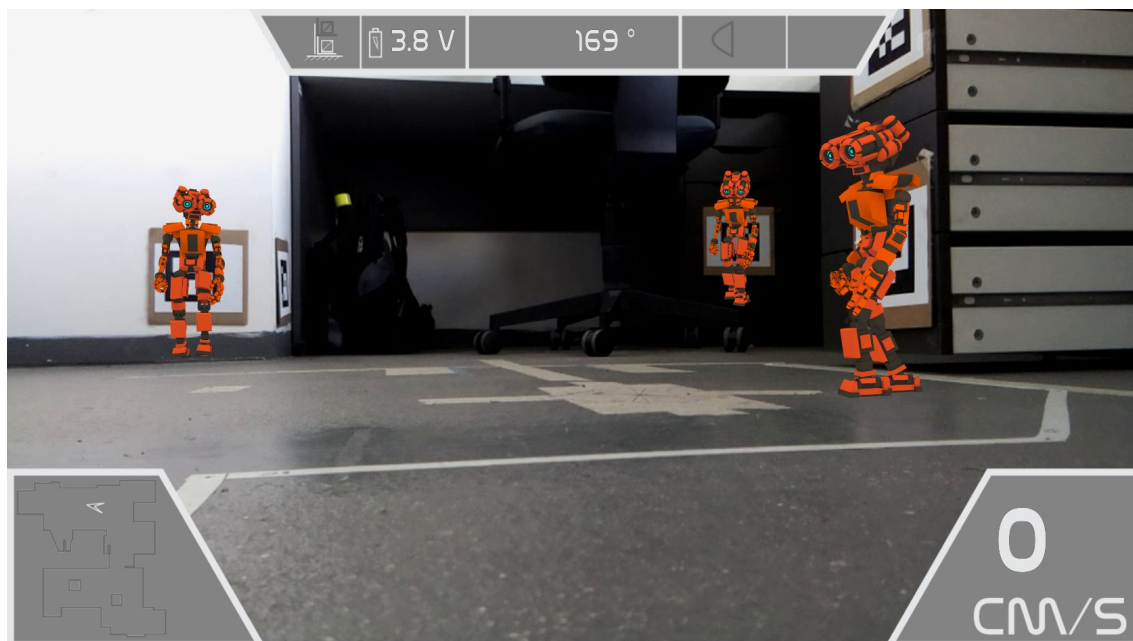
V zóně jedna má návštěvník za úkol přemístit pomocí manipulátoru objekt z jednoho místa na druhé. K přemísťování slouží kostka zobrazená na obrázku 6.12. Tato kostka byla navržena tak, aby se dala snadno zdvihnout pomocí manipulátoru robotu a aby se v případě překlopení vždy vrátila do výchozí polohy zobrazené na obrázku.

Místa, mezi kterými se kostka přemísťuje jsou pevně daná a jsou opatřena senzory, které detekují přítomnost kostky. Při vjezdu do zóny se nejdříve zjistí, na jaké pozici se v současné době kostka nachází a podle toho se návštěvníkovi zobrazí informační panel oznamující, na jakou pozici kostku umístit. Důvod proč se kostka přemísťuje mezi dvěma místy je následující.

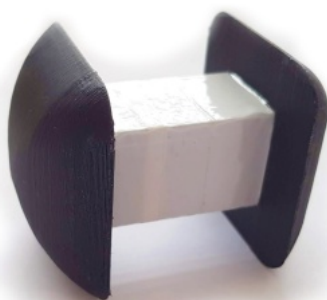
Prvním je ten, že se takto zajistí opakovatelnost úlohy. Pokud první návštěvník přemístí kostku z pozice A do pozice B, bude úkolem druhého návštěvníka přemístit ji zpět na pozici



Obrázek 6.10: Herní zóny



Obrázek 6.11: Ukázka 3D modelů v AR



Obrázek 6.12: Kostka

A. K navrácení úlohy do výchozího stavu tedy není zapotřebí zásahu obsluhy.

Výsledný exponát může být vybaven bránami, které budou oddělovat jednotlivé zóny a budou otvírány při splnění úkolu. Tím, že se kostka pro splnění úkolu musí nacházet na místě A nebo místě B, je zaručeno, že nedojde k jejímu odvezení ze zóny, což by způsobilo nemožnost splnění úkolu pro další hráče.

Pro detekci kostky byly použity infračervené dálkoměry tvořené IR LED a fotodiodou. Tyto senzory jsou spojeny s mikrokontrolérem na vývojové desce Arduino Promini, který je spojen pomocí sběrnice I²C s počítačem Rasperry Pi 3 Model B+, který slouží jako server. K tomuto serveru přistupuje program s uživatelským rozhraním a vyčítá data o poloze kostky pomocí TCP protokolu.

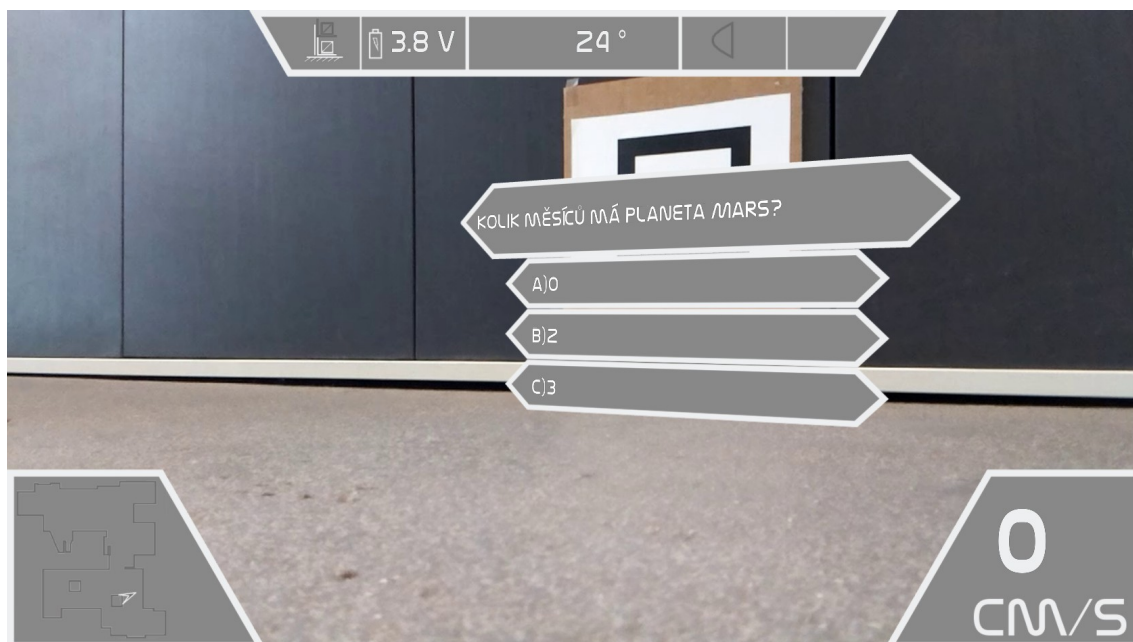
Idea je taková, že celý exponát bude mít vlastní počítač, který se bude chovat jako server a bude poskytovat data o stavu jednotlivých částí exponátu, popřípadě tyto části ovládat. Jednotlivé části poté budou ovládány vlastními mikrokontroléry, které budou komunikovat se serverem po určité sběrnici.

Zóna 2

Úkolem v této zóně je odpovědět na tématické otázky zobrazené prostřednictvím kvízů v AR. Kvízy, stejně jako celé prostředí je možné přepnout do jiného jazyka stiskem tlačítka na ovládací skříňce. Tyto kvízy mají tři možnosti a jednu správnou odpověď. Při najetí kurzoru na odpověď,

dojde k jejímu zvýraznění a při stisknutí tlačítka střelby dojde k odpovězení. Pokud je zvolená odpověď správná, zvýrazní se zeleně. Pokud není, zvýrazní se červeně a správná odpověď zeleně. Ukázka kvízu je zobrazena na obrázku 6.13.

Stejně jako v zóně nula, i tady dojde po jejím opuštění k obnově kvízů.



Obrázek 6.13: Ukázka kvízu v AR

7 Zhodnocení

7.1 Mobilní robot

Vytvořený mobilní robot slouží hlavně jako prototyp, na kterém byly vyzkoušeny jednotlivé prvky, se kterými se počítá u finální verze použité v exponátu.

Po konstrukční stránce se robot ukázal být jako velmi robustní a spolehlivý. Konstrukce nicméně obsahuje prvky a materiály, které pro finální verzi nejsou vhodné.

Příkladem může být manipulátor umístěný v přední části robotu, který je vytištěn na 3D tiskárně a je navržen tak, aby umožňoval zvedat určené objekty. V případě, že se bude používat nevhodným způsobem nebo bude schválně poškozován, tak neposkytuje takovou odolnost jako zbytek konstrukce. Ve finální verzi je tedy nutné uvažovat o jeho robustnějším provedení nebo výrobu jinou technologií.

Dalším prvkem, u kterého připadá v úvahu změna použitého materiálu je horní deska robotu, na které je umístěna řídicí elektronika. Tato deska byla z důvodu úspory materiálu vyříznuta ze stejného plátu překližky, jako části nabíjecí stanice. I když má překližka své výhody, je vhodné uvažovat o její náhradě z materiálu, který by byl stálejší a odolnější, například plexisklo. Další možností je zakomponovat ji do plánované kapoty robotu, s čímž souvisí další bod.

Z obrázků robotu v této práci je patrné, že byl navrhován hlavně z pohledu funkčnosti a ne vzhledu. Přičemž design výrobků je mnohdy důležitější než samotná funkčnost, zvláště u výrobků určených běžným zákazníkům. Což by v případě nabízení robotu jako edukativní hračky mohl být problém. Proto je nutné se při tvorbě finálního kusu zamyslet i nad vzhledem a v ideálním případě zapojit do procesu návrhu i průmyslového designéra.

Z hlediska elektroniky by případné vylepší mohlo směřovat k použití pokročilejšího způsobu měření stavu kapacity baterie než pouhého měření jejího napětí. Příkladem by mohlo být využití integrovaného obvodu, který k určení kapacity využívá metodu integrace nabíjecího a vybíjecího proudu společně s měřením napětí nezatížené baterie. Jinak je samotná řídicí jednotka velmi univerzální a vhodná i pro řízení dalších typů robotických podvozků nebo jiných zařízení. Díky využití platformy Arduino může být jednoduše využita se spoustou jiných modulů a senzorů.

7.2 Nabíjecí stanice

Nabíjecí stanice plní spolehlivě svůj účel navedení robotu k nabíjecímu konektoru a poskytuje další bezpečnostní mechanismy, které spolu s ochrannými obvody na baterii zajišťují bezpečný nabíjecí proces.

Stejně jako v případě robotu, tak i u nabíjecí stanice převládá funkčnost nad designem a i zde je nutné se zamyslet nad úpravou vzhledu a vhodného zakomponování nabíjecí stanice do stylizace celkového exponátu.

7.3 Uživatelské rozhraní

U uživatelského rozhraní byl dbán zřetel na jeho přehlednost a intuitivnost. Z hlediska zvýšení atraktivity je v plánu využití některého z volně dostupných herních enginů (např. Panda3D), které nabízejí pokročilé možnosti z hlediska využití animovaných 3D modelů, efektů a samotného renderování jednotlivých prvků.

Věc, která by mohla návštěvníky exponátu mást je to, že při pohledu z kamery nejde vidět pohyblivá vidlice manipulátoru. To, v jaké poloze se manipulátor nachází je indikováno na horní liště HUD, ale to, jak s robotem najet k objektu, už bez znalosti jeho konstrukce není patrné. Důvodem tohoto stavu je požadavek, aby převážený objekt, co nejméně vadil ve výhledu kamery. Do budoucna je nutné nalézt kompromis mezi vzájemnou polohou kamery a manipulátoru tak, aby bylo ovládání robotu a manipulace s objekty více intuitivní.

Rozšířená realita se v současné době vykresluje pouze na základě odhadu polohy kamery vzhledem k dané referenční značce. Do budoucna by bylo určitě velmi zajímavé použít údaje o poloze robotu v kombinaci s referenčními značkami a odhadem polohy na základě analýzy obrazu z kamery k vykreslování rozšířené reality i v případě, že žádná referenční značka není viditelná.

V současné době není odhad polohy robotu natolik přesný a stabilní, aby se dal využít při vykreslování AR, zvláště v případech, kdy robot nevidí v zorném poli referenční značku po delší dobu. Jelikož AR je hlavní důvod, co dělá celý tento koncept zajímavým, je nanejvýš žádoucí, aby byla zobrazována spolehlivě.

Dalším prvkem, který by zlepšil uživatelský zážitek by bylo využití stabilizace obrazu. Tato stabilizace může být jak hardwarová, tak i softwarová.

8 Závěr

V rámci této diplomové práce byl vytvořen čtyřkolový smykem řízený robot s nezávisle poháněnými koly umožňující bezdrátový přenos obrazu a manipulaci s objekty. Byl použit i v diplomové práci Patrika Vávry [4], která se zabývá jeho lokalizací a navigací v prostoru s využitím frameworku ROS. Tento robot má sloužit jako prototyp mobilního robotu, který bude využit v rámci interaktivního exponátu připravované robotické výstavy.

Robot byl navržen s ohledem na robustnost a spolehlivost konstrukce. Byla pro něj vytvořena vlastní elektronika pro nabíjení a ochranu baterie. Dále také rozšiřující deska pro počítač Raspberry Pi s mikrokontrolérem, která má na starost řízení motorů a čtení dat z enkodérů a IMU.

K nabíjení robotu slouží zkonstruovaná nabíjecí stanice, která obsahuje prvky usnadňující najetí robotu k nabíjecímu konektoru a další mechanismy zvyšující bezpečnost nabíjecího procesu.

Poslední částí práce je uživatelské rozhraní pro interakci s robotem využívající prvky rozšířené reality. Toto prostředí umožňuje uživateli jízdu s robotem a ovládání jeho manipulátoru a světel. Dále jsou referenční značky, které se používají k lokalizaci robotu, využity pro zobrazení rozšířené reality v podobě 3D modelů, interaktivních kvízů, obrázků a videí. Jednotlivé prvky uživatelského rozhraní jsou zkombinovány do podoby miniher pro návštěvníky exponátu.

Cíle diplomové práce byly splněny, ale jednotlivé výsledky ještě nejsou ve stavu, kdy by je bylo možné přímo použít v připravovaném exponátu. Nicméně byl vytvořen základ, který bude dále rozvíjen a bylo vyzkoušeno, které části mají potenciál zaujmout a které je nutno vylepšit nebo přepracovat.

Literatura

- [1] MiR500. In: *Mobile Industrial Robots* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/products/mir500/>
- [2] PMORPH. In: *SimplyInfo.org* [online]. 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.simplyinfo.org/?p=16126>
- [3] TRACK3R. In: *Mindstorms LEGO.com* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.lego.com/cs-cz/mindstorms/build-a-robot/track3r>
- [4] VÁVRA, Patrik. *Využití nástroje ROS pro řízení autonomního mobilního robotu*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Appel.
- [5] SIEGWART, Roland a Illah Reza NOURBAKHS. *Introduction to autonomous mobile robots*. 2004. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2004. ISBN 0-262-19502-x.
- [6] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed. *Springer handbook of robotics*. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.
- [7] Pioneer 3DX. *AG Technische Informatik: Equipment* [online]. 2017 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://www.ti.uni-bielefeld.de/downloads/equipment/PioneerPanoramaBack_small.jpg
- [8] Athena. In: *Using LabVIEW to Rapidly Build an Autonomous Robot and Compete in the Intelligent Ground Vehicle Competition* [online]. 2010 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/cms/images/casestudies/ahtenawebjpg.jpg>
- [9] 3WD Triangular 100mm omni wheel mobile robotics car 10003. In: *DIYTrade* [online]. 2017 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://img.diytrade.com/cding/1711010/32421019/0/1367229561/3WD_Triangular_100mm_omni_wheel_mobile_robotics_car_10003.jpg
- [10] RBK-SUMMIT. In: *Mobile Robot SUMMIT by Robotnik* [online]. 2014 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://en.manu-systems.com/images/M/RBK-SUMMIT.jpg>
- [11] KUKA youBot mobile platform. In: *Generation Robots* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://static.generation-robots.com/5379-large_default/kuka-youbot-mobile-platform.jpg
- [12] Jackal Vision Sensor Package. In: *Jackal UGV* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://clearpathrobotics.com/wp-content/uploads/2016/08/Jackal_Vision_Sensor_Package.png
- [13] KOBRA. In: *ENDEAVOR ROBOTICS - Products* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://endeavorrobotics.com/media/images/products/710-main.jpg>

- [14] SpotMini. In: *Boston Dynamics* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/styles/max_1300x1300/public/2019-01/MPM_0258-2.jpg?itok=Wp119BNq
- [15] Shrimp. In: *Edurobot* [online]. 2012 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://www.edurobot.ch/site/wp-content/uploads/2012/05/ROBOTIC_ROVER_7.jpg
- [16] Raspberry Pi 3 Model B+ - Raspberry Pi. In: *Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [17] Camera Module V2. In: *Raspberry Pi* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/>
- [18] BeagleBoard.org - blue. *BeagleBoard.org* [online]. 2018, 2018 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://beagleboard.org/blue>
- [19] Jetson Nano Brings AI Computing to Everyone. *NVIDIA Developer Blog* [online]. 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://devblogs.nvidia.com/jetson-nano-ai-computing/>
- [20] 2.4G Wifi Wireless Video Transmitter for FPV / CCTV WIFI audio/video transmission module. In: *AliExpress* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/2-4G-Wifi-Wireless-Video-Transmitter-for-FPV-CCTV-WIFI-audio-video-transmission-module/32684316101.html>
- [21] Wireless Video Transmission Module Camera Data Transmission OpenWRT For Wifi Smart Car. In: *Banggood* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.banggood.com/Wireless-Video-Transmission-Module-Camera-Data-Transmission-OpenWRT-For-Wifi-Smart-Car-p-1095043.html?cur_warehouse=CN
- [22] Coefficients of friction. *ROYMECH* [online]. 17.01.2013 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm#Rolling
- [23] Pololu - 313:1 Metal Gearmotor 20Dx46L mm 6V CB. *Pololu Robotics and Electronics* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/3709>
- [24] Pololu - Magnetic Encoder Pair Kit for 20D mm Metal Gearmotors, 20 CPR, 2.7-18V. *Pololu Robotics and Electronics* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/3499>
- [25] *INEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer* [online]. In: . STMicroelectronics, 2015 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00103319.pdf>
- [26] *SAM D21 Family Data Sheet* [online]. In: . Microchip Technology, 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAMD21-Family-DataSheet-DS40001882D.pdf>
- [27] ROMERO-RAMIREZ, Francisco J., Rafael MUÑOZ-SALINAS a Rafael MEDINA-CARNICER. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing* [online]. 2018, **76**, 38-47 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.004. ISSN 02628856. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262885618300799>

- [28] GARRIDO-JURADO, S., R. MUÑOZ-SALINAS, F.J. MADRID-CUEVAS a R. MEDINA-CARNICER. Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition* [online]. 2016, **51**, 481-491 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1016/j.patcog.2015.09.023. ISSN 00313203. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320315003544>
- [29] Detection of ArUco Markers. *OpenCV* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.1.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html
- [30] *GLFW: Documentation* [online]. 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.glfw.org/docs/latest/>
- [31] SZAUER, Gabor. *Game Physics Cookbook*. 1. Birmingham: Packt Publishing, 2017. ISBN 9781787123663.

Seznam zkratek

AABB	Axis Aligned Bounding Box.
AR	Augmented Reality.
CSI	Camera Serial Interface.
DPS	Deska Plošných Spojů.
ESD	Electrostatic discharge.
GUI	Graphical User Interface.
HAT	Hardware Attached on Top.
HUD	Head Up Display.
HW	Hardware.
I²C	Inter-Integrated Circuit.
IMU	Inertial Measurement Unit.
IR	Infra Red.
LED	Light Emitting Diode.
OBB	Oriented Bounding Box.
PoE	Power over Ethernet.
PWM	Pulse Width Modulation.
RAM	Random Access Memory.
ROS	Robot Operating System.
RPi	Raspberry Pi.
SiP	System in Package.
SLAM	Simultaneous localization and mapping.
SoC	System on Chip.
SoM	System on Module.
SPI	Serial Peripheral Interface.
SW	Software.
SWD	Single Wire Debug.
TCP	Transmission Control Protocol.
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter.
USB	Universal Serial Bus.

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotka
C_{nom}	Nominální kapacita baterie	Ah
F_N	Normálová síla	N
F_T	Tečná síla	N
F_g	Tíhová síla	N
F_{gx}	Průmět tíhové síly do osy x	N
F_{gy}	Průmět tíhové síly do osy y	N
I	Elektrický proud	A
J	Moment setrvačnosti	$kg\ m^2$
M_M	Točivý moment motoru	$N\ m$
P	Příkon	W
U_{nom}	Nominální napětí baterie	V
U	Elektrické napětí	V
α	Stoupavost	$^\circ$
ω_r	Požadovaná úhlová rychlost robotu	$rad\ s^{-1}$
ω_{lr}	Požadovaná úhlová rychlost kol na levé straně robotu	$rad\ s^{-1}$
ω_{rr}	Požadovaná úhlová rychlost kol na pravé straně robotu	$rad\ s^{-1}$
ω	Úhlová rychlost	$rad\ s^{-1}$
τ	Doba využití	$\%$
ε	Úhlové zrychlení	$rad\ s^{-2}$
ξ	Rameno valivého odporu	m
a	Zrychlení	$m\ s^{-2}$
d	Průměr kol	m
g	Tíhové zrychlení	$m\ s^{-2}$
h	Rozchod kol	m
m	Hmotnost	kg
$n_{\text{čl}}$	Počet článků baterie	—
n	Otáčky za minutu	$ot\ min^{-1}$
r	Poloměr kol	m
t	Čas	h
v_r	Požadovaná translační rychlost robotu	$m\ s^{-1}$
v	Rychlost	$m\ s^{-1}$
w	Počet hnaných kol	—

Seznam obrázků

1.1	Přehled mobilních robotů	9
3.1	Základní typy kol	12
3.2	Přehled trojkolových podvozků	13
3.3	Přehled čtyřkolových podvozků	14
3.4	ENDEAVOR ROBOTICS KOBRA [13]	14
3.5	Boston Dynamics SpotMini [14]	15
3.6	Shrimp [15]	15
3.7	Raspberry Pi 3 Model B+ [16]	16
3.8	Camera module V2 [17]	16
3.9	BeagleBone Blue [18]	17
3.10	NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [19]	18
3.11	Moduly pro bezdrátový přenos obrazu přes Wi-Fi	20
3.12	Varianty čtyřkolového smykem řízeného podvozku	21
3.13	Trojkolový diferenciálně řízený podvozek	22
4.1	Výsledný mobilní robot	24
4.2	Nosná konstrukce	25
4.3	Manipulátor	26
4.4	Řez manipulátorem	26
4.5	Nabíjecí konektor	27
4.6	Sestava kola	27
4.7	Uvolnění kola robotu	28
4.8	Charakteristika motoru	29
4.9	Motor s enkodérem [24]	30
4.10	Podřazená řídicí jednotka	32
4.11	Schéma zapojení měničů a komponent	32
4.12	Schéma propojení sběrnic a signálů	33
4.13	Baterie	35
4.14	Elektronika baterie	36
5.1	Nabíjecí sloupek s konektorem	37
5.2	Pohled na nabíjecí stanici	38
5.3	Řídicí jednotka nabíjecí stanice	39
5.4	Vývojový diagram procesu nabíjení baterie robotu	40
6.1	Grafické uživatelské rozhraní	42
6.2	Ovládací krabička	43
6.3	Joystick s mikropínači a analogový joystick	44
6.4	Mikrokontrolér s rozšiřující deskou v ovládací krabičce	44
6.5	Princip vykreslování obsahu	46

6.6	Promítnutí paprsku z kamery přes kurzor	47
6.7	Varianty ohraničujících kvádrů	47
6.8	Grafické znázornění hledání průsečíku paprsků s OBB	49
6.9	Princip vyhodnocování zásahu	49
6.10	Herní zóny	50
6.11	Ukázka 3D modelů v AR	51
6.12	Kostka	51
6.13	Ukázka kvízu v AR	52

Seznam tabulek

3.1	Porovnání jednodeskových počítačů	19
4.1	Výpočet celkového příkonu	34

Přílohy

Elektronické přílohy

- Zdrojové soubory pro DPS podřazené řídicí jednotky
- Zdrojové soubory pro DPS nabíjecího a ochranného obvodu baterie
- Zdrojové soubory pro DPS řídicí jednotky nabíjecí stanice
- Knihovny a podpůrné soubory pro podřazenou řídicí jednotku